



TITLE:

脱塩化ビニルとLCAを重視した電線・ケーブルの環境配慮設計に関する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

益尾, 和彦

CITATION:

益尾, 和彦. 脱塩化ビニルとLCAを重視した電線・ケーブルの環境配慮設計に関する研究. 京都大学, 2010, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2010-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k15379>

RIGHT:

脱塩化ビニルと LCA を重視した
電線・ケーブルの環境配慮設計に関する研究

2010 年

益 尾 和 彦

論文要旨

1990 年代後半に入り、塩化ビニル（以下、塩ビと言う）は燃やすと有毒なダイオキシン類を発生することが大きな社会問題になり、工場・ビル向けの汎用電線について、脱塩化ビニル（以下、脱塩ビと言う）、即ち、被覆材に塩ビを使用する塩ビ電線から、脱塩ビ電線（エコ電線）への切り替えを急速に進めることになった。一方、焼却できない廃塩ビの多くは埋め立てに回されることから、埋立処分場不足が問題となり、撤去廃電線から出る年間 15 万トンもの廃塩ビについても、その埋め立て処分量の減量対策を講じる必要に迫られた。そのため、電線を製造・供給する立場から、使用済み塩ビの電線へのリサイクル再使用の検討に取り組んだ。

一方、2005 年 2 月の京都議定書発効に伴い、全ての製造業者は、LCA（ライフサイクルアセスメント）に基づく生涯の CO_2 排出量を最小にした製品を社会に供給する義務を新たに負うことになった。それを受けて、電線について LCA 分析を行ったところ、ライフサイクル全体では、製造時に比べ通電使用時の CO_2 排出量が突出して大きいことがわかった。通電使用時の CO_2 排出量とは、通電による電力ロスを補うのに必要な電力を発電するために生じる CO_2 量である。この通電ロスを低減する方策として、電圧の昇圧化と導体サイズの適正化（サイズアップ）とが考えられるが、昇圧化に対し、サイズアップの検討は国内では過去に行われていないので、サイズアップによる CO_2 排出削減について検討を行うことにした。

本研究は、脱塩ビ電線（エコ電線）の開発と使用済み塩ビの電線への再使用、及び、電力ケーブルの導体サイズ適正化による通電ロス低減・ CO_2 排出削減に関するものであり、本論文では、前者（材料関連）を第 I 部に、後者（サイズ適正化）を第 II 部分けて述べる。

第 I 部（材料関連）

第 1 章では、電線被覆材のベース樹脂にメタロセン C8-LLDPE（メタロセン触媒で重合した長鎖分岐を多くもつ直鎖状低密度ポリエチレン）を選定し、それに難燃剤の $\text{Mg}(\text{OH})_2$ （水酸化マグネシウム、以下水マグと言う）を高充填（140 部充填、部とはベース樹脂 100 重量部に対する充填剤の配合重量部数を表す）することで、加熱変形しにくく、難燃性かつ加工性に優れたエコ電線を開発した。同時に、従来不明であった水マグの吸熱作用による難燃性付与メカニズムについても解明した。さらに、難燃剤を高充填した樹脂が持つ実使用上の 4 つの問題点（白化現象、絶縁抵抗低下現象、汗をかく現象、沿面フラッシュオーバー現象）の対策として、電線被覆層を 2 層にし、その外層は難燃剤の入っていない樹脂を薄く被覆する構造を考え、試作実験により、その構造が抜本対策となることを明らかにした。

エコ電線に難燃剤として多量充填されている水マグを、従来の合成品（製造時エネルギー消費量大）から天然品（製造時エネルギー消費量小）に替えることで、 CO_2 の大幅

削減が可能になる。第2章では、天然水マグの長所を生かしつつ、欠点を技術的に補い、さらに赤リン添加によりその充填量を必要最低限にまで減らすことで、製造時におけるCO₂を塩ビ電線対比 20% 程度まで削減したエコ電線を実現した。

第3章では、使用済み塩ビを再使用して製造した電線が、次の一生涯(ライフサイクル)の使用に耐えることを確認するため、まずバージン塩ビを用いた実験室レベルの実験で、塩ビは2回のライフサイクルに十分耐えることを明らかにした。また、使用済み塩ビ電線から採取した塩ビをそのまま電線に再使用しても次のライフサイクルに耐えるレベルにあることを確認し、同時に、ポリエチレンが5%以下混入していても問題なく使えること、10%混入の場合でも、ポリマーアロイ技術を適用することで使用に耐えるレベルになることを明らかにした。一方、回収農業用塩ビフィルムの劣化は分子鎖の切断まで進んでいないことを確認し、再生配合により電線用として再使用できることを明らかにした。

第Ⅱ部 (サイズ適正化)

導体サイズの適正化(サイズアップ)を実施に移すには、大きくすべき最適なサイズを決める必要がある。第1章では、IEC規格の経済性重視の考え方をベースに、最適なサイズについて検討を行った。その結果、サイズを導体断面積で2倍に大きくすることで、ライフサイクルコスト(LCC)をミニマムにできることを示すとともに、サイズアップによるCO₂削減量について概略の試算を行い、日本全国総CO₂排出量の約1%に相当する削減が可能という結果を得た。さらに、CO₂削減効果では、導体サイズアップが昇圧化より有効であることを明らかにした。

第2章では、サイズアップを進める対象となる電線・ケーブルと、それを進めるにあたっての技術的諸課題への対応につき検討した。具体的には、工場・ビルで大量に使用されている低圧CV-Tケーブルを対象に、表面の温度上昇を測定すれば、取り替えの対象ケーブルが特定できると考え、その可能性を確認するため、通電ロスによるケーブル表面温度上昇値をサイズアップ前後それぞれの場合につき計算で求めた。かつ、サイズアップ前後それぞれのケーブルを用い1ヶ月間の通電実験を行い、両ケーブルの通電ロス量と表面温度上昇値の違いを実測し、それらが理論通りの結果になることを確認した。また、住宅の200V配線に使用されているVVFケーブルを対象に、サイズアップしてもたわみ性を損なわない複合構造の新規ケーブルを開発し、エコキュートとIHクッキングヒータの電源電線用としての適用を検討した。

サイズアップの普及のためには、経済性と環境性(CO₂排出)の双方の観点から、適正なサイズの決定指針を作り、それを国内規格や国際規格(IEC)にすることが必要となる。第3章では、IEC規格のライフサイクルコスト(LCC)の考え方をベースにして、新たにライフサイクルアセスメント(LCA)に基づくケーブルの一生涯におけるCO₂排出量の考え方を取り入れ、それをコスト換算して加算した。その結果得られるLCCとLCAの合算値を新たな定義のライフサイクルコストとし、それがミニマムとなる最適電流値を算出するという、新しい導体サイズ決定指針を案出した。また、負荷電流パター

ンの実態を、工場や事務所ビルなど分野ごとに調査したところ、3つのケースに明確に区分できることがわかったので、それぞれ別々に、電流パターンに応じ最適電流値を算出することで、指針のさらなる明確化を図った。

第4章では、上記の「新しい導体サイズ決定指針」に基づき、日本全国の需要家（工場・ビル）構内の低圧 CV-T ケーブル（1,900 千 km）を全てサイズアップ品に置き替えた時、それによる日本全国の年間総 CO₂ 排出削減量は 9.5 百万 t になることを明らかにした。これは、1990 年の日本全国総排出量（1,261 百万 t）の 0.75 % に相当する。また、発電端から需要家受電端までの送配電ロス（約 7%）についてはよく知られてきたが、今回、受電端以降の需要家構内低圧 CV-T ケーブルによる通電ロスが、さらに 4% 程度あることが明らかになり、併せて、サイズアップにより 4% から 2% にまで半減できることを明らかにした。

目 次

| | ページ |
|---|-----|
| 序論 | 1 |
| 第 I 部 脱塩化ビニル電線(エコ電線)の開発と使用済み塩化ビニルの電線への再使用 | 4 |
| 第 1 章 エコ電線の難燃性材料とその最適被覆構造 | 4 |
| 1.1 まえがき | 4 |
| 1.2 ベース樹脂の選定 | 4 |
| 1.2.1 各種候補樹脂の加熱変形特性 | 4 |
| 1.2.2 メタロセン C8-LLDPE の選定 | 6 |
| 1.3 難燃剤の選定 | 8 |
| 1.4 エコ電線の 2 層被覆構造化の検討 | 10 |
| 1.4.1 水酸化マグネシウム高充填の問題点 | 10 |
| 1.4.2 2 層被覆構造化による対策 | 11 |
| 1.5 あとがき | 14 |
| 参考文献 | 15 |
| 第 2 章 エコ電線の難燃性材料への天然水酸化マグネシウム適用と赤リン添加によるその充填量低減 | 16 |
| 2.1 まえがき | 16 |
| 2.2 天然水酸化マグネシウムの微粉碎と高吸湿性の原因究明 | 16 |
| 2.3 乾式表面処理による天然水酸化マグネシウムの吸湿性低減 | 18 |
| 2.3.1 乾式表面処理と吸湿性試験 | 18 |
| 2.3.2 絶縁抵抗測定 | 21 |
| 2.4 赤リン添加による水酸化マグネシウム充填量の低減 | 23 |
| 2.4.1 赤リン添加と難燃性試験 | 23 |
| 2.4.2 VOT 試験 | 26 |
| 2.4.3 赤リンの安全性 | 26 |
| 2.5 CO ₂ 排出量削減効果の検討 | 28 |
| 2.6 あとがき | 29 |
| 参考文献 | 29 |
| 第 3 章 リサイクル塩化ビニル電線の残存寿命と再生技術 | 31 |
| 3.1 まえがき | 31 |
| 3.2 塩化ビニルのリサイクル性と耐熱寿命の評価 | 31 |
| 3.2.1 押出加工実験 | 32 |

| | | |
|---|---|----|
| 3.2.2 | 加熱老化促進実験 | 33 |
| 3.3 | リサイクル 0W 電線の残存寿命の評価 | 34 |
| 3.3.1 | 廃電線から採取した塩化ビニルの 0W 電線への再利用 | 34 |
| 3.3.2 | 解体 PVC 皮の加工と電線試作 | 35 |
| 3.3.3 | リサイクル 0W 電線の残存寿命 | 37 |
| 3.4 | ポリエチレン混入塩化ビニルとポリマーアロイ技術の適用 | 39 |
| 3.5 | 回収農業用塩化ビニルフィルムの劣化調査及び再生配合の検討 | 42 |
| 3.5.1 | 回収農業用塩化ビニルフィルムの劣化調査 | 42 |
| 3.5.2 | 再生配合の検討 | 45 |
| 3.6 | リサイクル塩化ビニル電線の LCA 分析 | 47 |
| 3.7 | あとがき | 48 |
| | 参考文献 | 48 |
| 第Ⅱ部 電力ケーブルの導体サイズ適正化による通電ロス低減・CO ₂ 排出削減 | | |
| 第Ⅱ部 電力ケーブルの導体サイズ適正化による通電ロス低減・CO ₂ 排出削減 | | |
| 第1章 | サイズ適正化によるライフサイクルコストのミニマム化 | 49 |
| 1.1 | まえがき | 49 |
| 1.2 | 電線使用時の通電ロス量・CO ₂ 排出量と導体のサイズアップ | 49 |
| 1.3 | ライフサイクルコストを考慮した最適導体サイズ | 51 |
| 1.3.1 | ライフサイクルコスト | 52 |
| 1.3.2 | 諸定数の決定 | 52 |
| 1.3.3 | 計算結果 | 53 |
| 1.4 | 導体サイズアップによる CO ₂ 排出量低減効果 | 56 |
| 1.5 | サイズアップと昇圧化の CO ₂ 削減効果比較 | 60 |
| 1.6 | あとがき | 61 |
| | 参考文献 | 61 |
| 第2章 | ビル・工場及び住宅の低圧配線を対象とした電線・ケーブル (CV-T, VVF) の導体サイズアップの検討 | 63 |
| 2.1 | まえがき | 63 |
| 2.2 | 通電ロスによるケーブル表面温度の上昇 | 63 |
| 2.3 | 通電ロス量とケーブル表面温度の実測実験 | 66 |
| 2.4 | 住宅用 VVF ケーブルの導体サイズアップ | 68 |
| 2.5 | あとがき | 73 |
| | 参考文献 | 73 |
| 第3章 | 経済性 (LCC) と環境性 (LCA) を考慮した電力ケーブルのサイズ 適正化の指針構築 | 74 |
| 3.1 | まえがき | 74 |

| | ページ |
|--|---------|
| 3.2 イニシャルコスト | 74 |
| 3.2.1 初期投資コスト | 74 |
| 3.2.2 製造時と撤去廃棄時の CO ₂ 排出量 | 75 |
| 3.2.3 イニシャルコスト | 77 |
| 3.3 ランニングコスト | 77 |
| 3.3.1 通電使用時コスト | 77 |
| 3.3.2 通電使用時 CO ₂ 排出量 | 79 |
| 3.3.3 ランニングコスト | 80 |
| 3.4 ライフサイクルコストとそれがミニマムとなる最適電流値 | 81 |
| 3.5 サイズアップ倍率と環境効率 | 84 |
| 3.5.1 サイズアップ | 84 |
| 3.5.2 環境効率とファクター | 85 |
| 3.6 負荷電流パターンごとの環境配慮電流値の算出 | 87 |
| 3.6.1 負荷電流パターンの実態調査 | 87 |
| 3.6.2 ケース別の環境配慮電流 | 89 |
| 3.7 あとがき | 91 |
| 参考文献 | 91 |
| 第4章 サイズアップによる日本全国の通電ロス低減量・CO ₂ 排出削減量の算出 | 92 |
| 4.1 まえがき | 92 |
| 4.2 最大負荷電流値の調査・推定 | 92 |
| 4.3 環境配慮電流表に基づくサイズ決定 | 94 |
| 4.4 ケーブル布設長 | 97 |
| 4.5 ケーブルの需要率 | 99 |
| 4.6 通電ロス低減量の算出 | 100 |
| 4.7 CO ₂ 排出削減量の算出 | 103 |
| 4.8 あとがき | 104 |
| 参考文献 | 104 |
| 結論 | 106 |
| 謝辞 | 109 |
| 発表論文リスト | 110 |

序論

電線・ケーブルの被覆材には塩化ビニル（以下、塩ビと言う）が使われてきたが、1980年代になり、ビルや地下街での火災事故を契機に、人の多く集まる場所で使われる電線ケーブルについてノンハロゲン高難燃化のニーズが強まった。これを受け、当時筆者らは、その被覆材料のベース樹脂に EVA（エチレン酢酸ビニル共重合体）や EEA（エチレンアクリル酸エチル共重合体）、難燃剤に $\text{Al}(\text{OH})_3$ （水酸化アルミニウム）や $\text{Mg}(\text{OH})_2$ （水酸化マグネシウム）をそれぞれに用いたノンハロゲン高難燃性ケーブル（商品名：ノンハロセフレム、クリーンフレフネン）を開発し、このニーズに応えた¹⁾。このケーブルは、燃焼時に発生するハロゲン化水素や煙をゼロか極小にすることを最優先にしたため²⁾、加熱変形性など一部特性や、加工性やコスト面で、そのニーズに十分応えるレベルにはなかった。そのため、このケーブルは、特殊な場所や用途に限定して使わざるをえなかった。

1990年代後半に入り、塩ビは燃やすと有毒なダイオキシン類を発生することが大きな社会問題になり^{3), 4)}、それ以来、工場・ビル向けの汎用電線について、脱塩ビ、即ち、塩ビ電線からエコ電線への切り替えが強く求められている。エコ電線とは、「塩ビの代わりにハロゲン及び重金属を含まない耐燃性ポリエチレンを使用した電線ケーブル：エコロジー電線（略称、エコ電線）」として、1998年に日本電線工業会規格（JCS）により制定されたものである^{5), 6)}。このエコ電線用コンパウンド（エコマテリアル）に使用されるポリエチレンの最大の弱点は燃えやすい特性であり、電線の被覆材料を塩ビからポリエチレンに代えると、ノンハロゲン化はできても難燃性が得られなくなる。そのため、ベースのポリエチレンに難燃剤を多量充填することによって難燃性を付与することが必要となるが、難燃剤の充填量を増やすと、それに伴い樹脂の強度が低下するとともに、押出加工性が低下し樹脂の表面状態の悪化を招くことになる。これらの問題を解決するため、ベース樹脂とそれに充填する難燃剤の最適な選定が重要となる⁷⁾。

一方、焼却できない廃塩ビの多くは埋め立てに回されることから、埋立処分場不足が問題となり、撤去廃電線から出る年間15万トンもの廃塩ビについても、その埋め立て処分量の減量対策を講じる必要に迫られており、電線を製造・供給する立場から、電線メーカーは使用済み塩ビの電線へのリサイクル再使用の検討を早急に進めるよう強く求められている^{8), 9)}。

2005年2月の京都議定書発効に伴い、全ての製造業者は、LCA（Life Cycle Assessment）に基づく生涯における CO_2 排出量を最小にした製品を社会に供給

する義務を負うことになった。工業製品は、その原材料の調達から製造、使用、そして廃棄物となるまでの一生（ライフサイクル）において、環境に対し多くの負荷（CO₂排出）をもたらしている。このように産業社会で生産されている様々な製品のライフサイクルの各プロセスにおける CO₂ 排出量を、客観的かつ科学的かつ総合的に評価する手法の一つがライフサイクルアセスメント (LCA) である。電線メーカーにとっても、電線・ケーブルの環境配慮設計を進めていく上で LCA は重要となる。そのため、エコ電線やリサイクル塩ビ電線についても、製造時の CO₂ 排出量の評価・検証が必要となり、LCA 計算のインベントリーデータが出揃ったのを受け、従来の塩ビ電線と比較しながら LCA 分析を行うこととなった¹⁰⁾。

一方、この電線の LCA 分析の過程で、資源採掘→素材製造→電線製造→電線の施工→電線の使用→電線の解体→埋立/焼却のライフサイクルの内、‘電線の使用’における環境負荷、つまり電力ケーブルを 20 年間通電使用した時の通電ロスによる CO₂ 排出量が突出して大きいことがわかった。この通電ロスを低減する方策として、電圧の昇圧化と導体のサイズアップとが考えられるが、国内の文献類を調査した結果、昇圧化が多くの研究機関等で検討されているのに対して、サイズアップの検討は過去に行われていないことがわかった。サイズアップによる CO₂ 排出削減についての検討は、言わば盲点であったと言える¹¹⁾。

以下、本論文では、前半の第Ⅰ部で、「脱塩ビ電線(エコ電線)の開発と使用済み塩ビの電線への再使用」の材料関連について述べる。第1章では、「エコ電線の難燃性材料とその最適被覆構造」、第2章では、「エコ電線の難燃性材料への天然水酸化マグネシウム適用と赤リン添加によるその充填量低減」、第3章では、「リサイクル塩化ビニル電線の残存寿命と再生技術」のそれぞれについて述べる。

また、後半の第Ⅱ部で、「電力ケーブルの導体サイズ適正化による通電ロス低減・CO₂ 排出削減」のサイズ適正化について述べる。第1章では、「サイズ適正化によるライフサイクルコストのミニマム化」、第2章では、「ビル・工場及び住宅の低圧配線を対象とした電線・ケーブル (CV-T, VVF) の導体サイズアップの検討」、第3章では、「経済性 (LCC) と環境性 (LCA) を考慮した電力ケーブルのサイズ適正化の指針構築」、第4章では、「サイズアップによる日本全国の通電ロス低減量・CO₂ 排出削減量の算出」のそれぞれについて述べる。

参考文献

- 1) Mamoru KONDO, Yasuo TORIUMI, Takahisa HIURA, Kazuhiko MASUO, Toshio

- MORISHITA, Yasuyuki KAWAMOTO, Koujiro ISHISE : “ Development of Non-Halogen Flame-Retardant Wires & Cables ” , Sumitomo Electric Technical Review, Number 24, pp.108~116 (1985)
- 2) 武田邦彦、森本孝克、位地正年ほか：「ノンハロゲン系難燃材料による難燃化技術」、(株)エヌ・ティー・エス (2001)
 - 3) 渡辺正、林俊郎：「ダイオキシン」、(株)日本評論社 (2003)
 - 4) 酒井伸一：「ダイオキシン類のはなし」、日刊工業新聞社 (1998)
 - 5) 会田二三夫、瀬田寧、川端秀雄ほか：「エコ材料の最先端」、(株)エヌ・ティー・エス (2004)
 - 6) 山本良一、土肥義治、原田幸明、鈴木淳史：「エコマテリアルハンドブック」、丸善(株) (2006)
 - 7) 益尾和彦：「エコ電線の新規難燃材料適用と今後の市場拡大の可能性について」、電気設備学会誌、Vol. 25、No. 11、pp. 850~853 (2005)
 - 8) 中條澄、上野晃史、新居宏美ほか：「廃塩化ビニルの脱塩素化・リサイクル技術」、(株)エヌ・ティー・エス (1999)
 - 9) 益尾和彦：「使用済み塩ビの電線への再利用技術と廃塩ビの埋め立て処理の実態」、電気設備学会誌、Vol. 27、No. 2、pp. 143~147 (2007)
 - 10) 柳良夫：「塩ビ樹脂製品のマテリアルリサイクルとLCA」、塩ビ工業・環境協会 HP
 - 11) 益尾和彦：「LCA を重視した電線ケーブルの環境配慮設計」、電気と工事、Vol. 47、No. 1、pp. 79~85 (2006)

第 1 部 脱塩化ビニル電線 (エコ電線) の開発と

使用済み塩化ビニルの電線への再使用

第 1 章 エコ電線の難燃性材料とその最適被覆構造

1. 1 まえがき

序論で述べた通り、1980 年代当時、被覆材料のベース樹脂に EVA (エチレン酢酸ビニル共重合体) や EEA (エチレンアクリル酸エチル共重合体)、難燃剤に $\text{Al}(\text{OH})_3$ (水酸化アルミニウム) や $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (水酸化マグネシウム) をそれぞれに用いたノンハロゲン高難燃性ケーブル (商品名: ノンハロセフテム、クリーンフレフネン) を開発した¹⁾。このケーブルは、燃焼時に発生するハロゲン化水素や煙をゼロか極小にすることを最優先にしたため、加熱変形性など一部特性や、加工性やコスト面で、そのニーズに十分応えるレベルにはなかった。そのため、このケーブルは、特殊な場所や用途に限定して使わざるをえなかった。

このような経緯を踏まえ、本章では、加熱変形性など特性を十分満たし、かつ加工性やコスト面に優れた汎用性のあるエコ電線を目指して、最適なベース樹脂と難燃剤の絞り込みを行う。同時に、従来不明であった難燃剤に用いる金属水和物の吸熱作用による難燃性付与メカニズムについても解明する。また、難燃剤を高充填した樹脂が持つ実使用上の 4 つの問題点 (白化現象、絶縁抵抗低下現象、汗をかく現象、沿面フラッシュオーバー現象) の対策として、電線被覆層を 2 層にし、その外層は難燃剤の入っていない樹脂を薄く被覆する構造を考え、試作実験によりその効果を検証する。

1. 2 ベース樹脂の選定

1. 2. 1 各種候補樹脂の加熱変形特性

電線ケーブルの被覆材料として、実用上重要な特性に加熱変形性がある。この特性は樹脂の融点温度と密接に関係すると言われている。図 1.1.1 は会田ら²⁾によるもので、PVC (ポリ塩化ビニル) の他、代表的ポリオレフィン系樹脂の EVA、EEA、LLDPE (直鎖状低密度ポリエチレン)、PP (ポリプロピレン) それぞれ

の DSC (示差走査熱量測定) 融解曲線を示したものである。横軸に温度をとって、縦軸にサンプル樹脂と基準物質との温度差により生じる熱流量 (単位重量当り) をとっており、それぞれのカーブから、吸熱・発熱のピークを検出することができる。これより、PVC は明確な融点のピークを持たないのに対し、結晶性のポリオレフィン系樹脂は明確な融点のピークを持ち、それらを融点温度の低い順から並べると、EVA (88℃) < EEA (95℃) < LLDPE (120℃) < PP (151℃) になることがわかる。

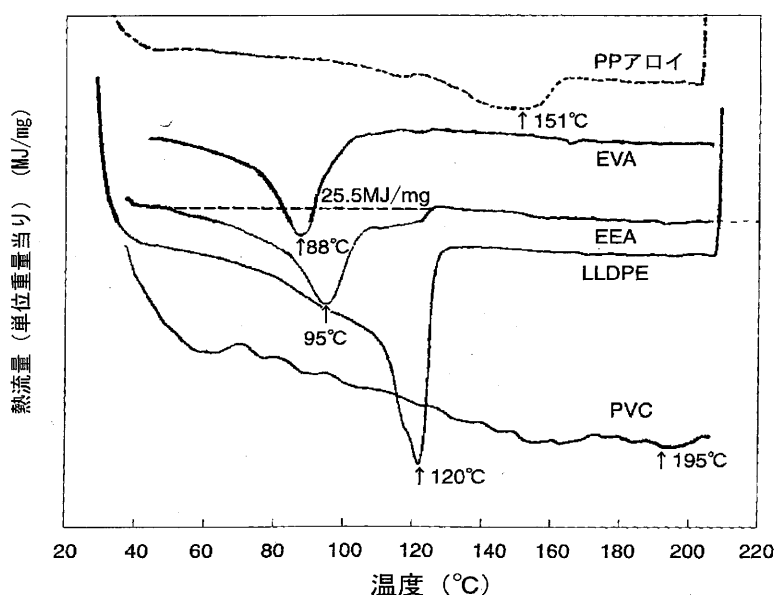


図 1.1.1 各種樹脂の DSC 融解曲線 2)

上記のデータを参考に、各種樹脂を用い加熱変形試験を実施した。まず、PVC、EVA、EEA、LLDPE の標準配合のシートサンプル (厚さ約 2 mm) を用意し、JIS C 3005 の 25 に規定の「加熱変形試験方法」に基づき試験を行った。試験結果を 表 1.1.1 に示す。ポリオレフィン系樹脂の中でもかなりの違いがあり、EVA は 100℃を、EEA は 120℃を超えると急激な加熱変形が起こるのに対し、LLDPE は 130℃を超えても緩やかにしか起こらず、かつ、その変形の程度が PVC に比べても遥かに小さいことがわかった。

加熱変形特性は、事故時過電流による絶縁体の変形や、ケーブル外部が高温にさらされた時のシースの変形等に直接関係する。そのため、大容量太サイズで重量の大きいケーブルの場合を念頭に置き、ベース樹脂は実績ある PVC 並みに加熱変形しにくい材料にすべきと考え、加熱変形性の劣る EVA と EEA は候補から外し、LLDPE に的を絞って検討することにした。なお、PP については、銅害 (銅により熱老化性能が落ちる) の問題に加え、曲げ弾性率が極めて高く電線被覆材としての特性を欠くことより候補から外した。

表 1.1.1 各種樹脂の加熱変形試験結果 (%)

| 材 料 | 70℃ | 80℃ | 90℃ | 100℃ | 110℃ | 120℃ | 130℃ | 140℃ | 150℃ |
|-------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|
| EVA | 0 | — | 0 | 5 | 30 | 50 | 75 | — | 90 |
| EEA | 0 | — | 0 | — | 0 | 5 | 45 | 60 | 80 |
| LLDPE | 0 | — | 0 | — | 0 | 0 | 5 | — | 10 |
| PVC | 5 | 5 | 5 | — | 10 | — | 15 | — | 30 |

1. 2. 2 メタロセン C8-LLDPE の選定

樹脂 (ポリマー) に難燃剤を高充填していくとポリマーの引張強度は低下し、最後はケーブルシースに必要な引張強度 (規格値 1.0 kg/mm^2) を下回ることになる。従って、難燃剤の充填量を増大するには、ベースポリマーに初めから引張強度の高い材料を選ぶ必要がある。一般に、ポリマーの分子量分布 (MWD) が狭くなって単分散 (MWD=1) に近づくほど、その引張強度が高くなることが知られている。そこで、LLDPE の中で最も MWD が狭くシャープなものという観点から検討した結果、メタロセン触媒で重合した LLDPE (以下、メタロセン LLDPE という) を見いだした。

メタロセン触媒は、図 1.1.2 に模式的に示すように、従来のチーグラ触媒がマルチサイトであるのに対してシングルサイトであるため、狙った通りの分子量分布と組成分布を持つポリマーが自由に作れ、ポリマー本来の性能を発揮できるという特長を持つ。つまり、メタロセン LLDPE はその分子量分布が大変狭くシャープなためポリマーそのものの引張強度が約 3.5 kg/mm^2 と高くなり、結果として難燃剤の充填量を増大することが可能になる。なお、従来のチーグラ触媒による LLDPE の引張強度は $1.5 \sim 2.0 \text{ kg/mm}^2$ 程度である。

一方、分子量分布が狭くなると低分子量成分が少なくなり、副作用として高剪断時の剪断粘度低下が小さく、押出トルクが高く加工性が悪くなる。そこで、長鎖分岐を多く持つポリマーであれば、分子同士の絡み合い頻度が大きくなり高剪断時の剪断粘度低下に効果を発揮する可能性に着目し、メタロセン LLDPE の中で最も長鎖分岐を多く持つものという観点から検討した結果、エチレンとオクテン-1 を共重合してなる直鎖状低密度ポリエチレン (C8-LLDPE) が最適であることを見いだした^{3), 4), 5)}。

加工性を定量的に表す指標として、溶融時の張力 (メルトテンション MFR) がある。MFR が高くなると、押出ダイス通過直後に生じる肌粗現象を低減させることになる。円滑な押出加工のためには、MFR は $0.5 \sim 2.0 \text{ g/10 分}$ の範囲にあることが望ましいが、C8-LLDPE の MFR は 0.8 g/10 分 でその範囲内にあることをメーカーのデータで確認した。

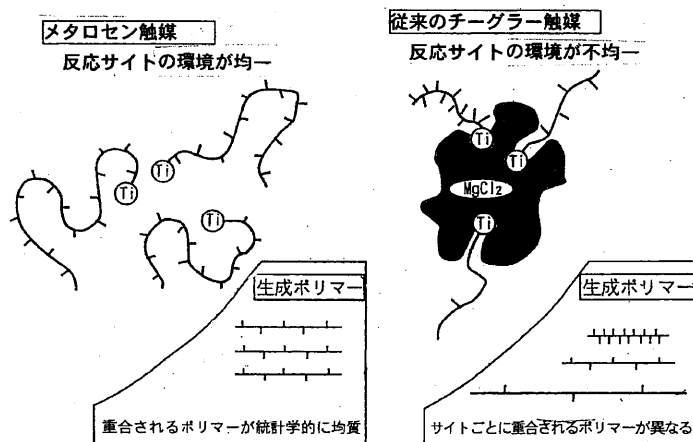


図 1.1.2 メタロセン触媒による均質なポリマーの重合

次に、C8-LLDPE 中に充填剤(難燃剤も充填剤の一種)を増量していった時の引張強度低下の程度を、従来のチーグラー触媒による LLDPE の場合と比較して実験で求めた。結果を 図 1.1.3 に示す。LLDPE は $1.5 \sim 2.0 \text{ kg/mm}^2$ 、C8-LLDPE は 3.5 kg/mm^2 の引張強度であったものが低下してゆき、充填剤増量後の引張強度が規格値 (1.0 kg/mm^2) を満たすためには、LLDPE には最大 80 部しか配合できないのに対し、C8-LLDPE には 200 部まで配合できることがわかった。ここで言う部数とは、ベース樹脂 100 重量部に対する充填剤の配合重量部数を表すものである。

なお、この実験は、基礎的データをとる目的で、代表的充填剤の CaCO_3 (炭酸カルシウム) を用いたが、後述の難燃剤(金属水和物)の場合でもほぼ同じ特性を示すことを確認している。

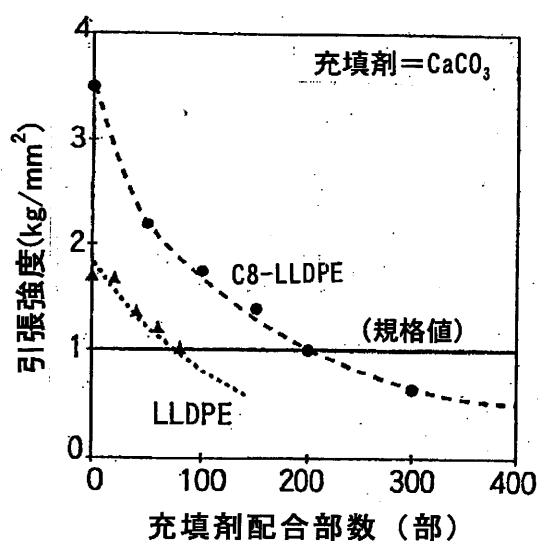


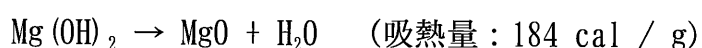
図 1.1.3 充填剤の配合部数と材料の引張強度低下の関係

また、メタロセン触媒による LDPE（低密度ポリエチレン、LLDPE も LDPE の一種）を電力ケーブルへ適用するにあたり、従来のチーグラ触媒による LDPE と比較して、特にその絶縁性能面に焦点を当てた検討が、水谷、石岡ら⁶⁾により進められた。それによると、インパルスと直流絶縁破壊特性でメタロセン LDPE が従来のチーグラ触媒による LDPE より高い破壊強度を示し、その理由としてメタロセン LDPE の構造が従来の LDPE に比べ均質で大きな電氣的弱点部の形成のないことがあげられると報告されている。また、メタロセン LDPE では注入電極側にホモ空間電荷を形成しやすく、その電界緩和も破壊特性の向上に影響しているとの見解が示されており、さらに、メタロセン LDPE の電気トリ一発生電圧は従来の LDPE より高く、耐トリ一ング性においても優れることが示唆されている。以上より、エコ電線にメタロセン LLDPE を採用するにあたって、その絶縁性能に関し一定の確認を得た。

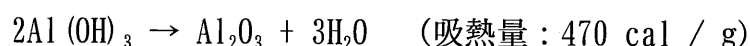
1. 3 難燃剤の選定

エコ電線用コンパウンド（組成物）には、塩素や臭素といったハロゲン系の難燃剤でなくノンハロゲン系の難燃剤を選ぶ必要がある。ポリエチレンのノンハロゲン難燃化は、一般に難燃剤として金属水和物を充填する方法で行われ、金属水和物は結晶水の放出による吸熱作用により難燃性を付与する。一般的に入手できる金属水和物として、水酸化アルミニウム $\text{Al}(\text{OH})_3$ と水酸化マグネシウム $\text{Mg}(\text{OH})_2$ （以下、水マグと言う）とがあり、両者の燃焼時における結晶水放出化学式と結晶水放出による吸熱量は次の通りである^{2), 7)}。

①水酸化マグネシウム



②水酸化アルミニウム



実験で、ポリエチレン中に両者をそれぞれ変量配合した時の酸素指数 (O. I.) の変化を求めた。O. I. (Oxygen Index) とは、材料の燃焼が持続する最低の酸素濃度を示すもので難燃性の定量評価に一般的に用いられる。空気中の酸素濃度が約 21% であるので、O. I. が 21 以下の材料は可燃性、21 以上は難燃性であり、O. I. 値が大きいほど難燃性が高いことになる。

実験は、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ と $\text{Mg}(\text{OH})_2$ をそれぞれ定められた量を配合した LDPE のシートサンプルを用意し、JIS K 7201 に規定の「酸素指数測定法」に基づき行った。各配合量ごとのサンプル数は 3 とした。実験の結果を図 1. 1. 4 に示す。これより、配合量が 50 部を超えると同じ配合量であっても、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ に比べ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ の方がより高い難燃性 (O. I.) を示すことがわかった。

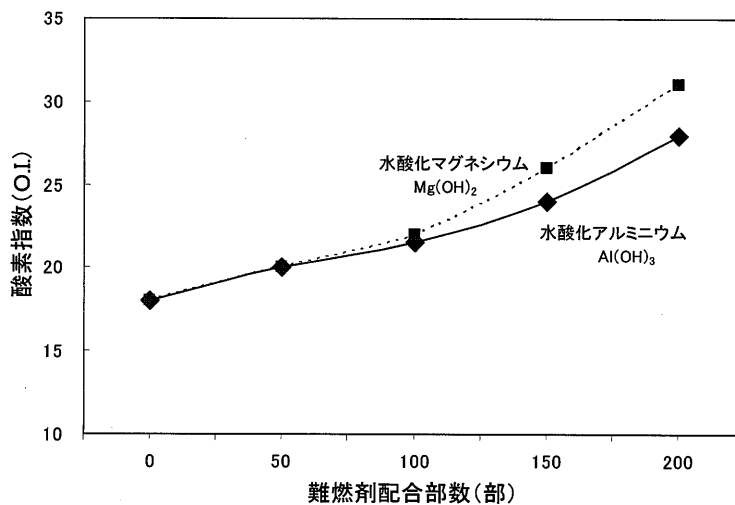


図 1.1.4 難燃剤配合部数と酸素指数 (O. I.) の関係

ここで、 $Al(OH)_3$ (吸熱量：470 cal/g) は、 $Mg(OH)_2$ (同：184 cal/g) に比べ、吸熱量が大きいにもかかわらず難燃性 (O. I.) が逆転するのは、 $Mg(OH)_2$ の結晶水放出温度がポリエチレンの分解温度に近く、効率的に燃焼を阻害するためと考えた。そのことを確認するため、ポリエチレンに両者を 150 部添加した組成物で、その加熱減量を実験で求めた。試験は IEC 60811 の 3-2 項に規定の「加熱減量試験方法」に基づき、窒素雰囲気中において、20℃/分の昇温速度で行った。結果を 図 1.1.5 の加熱減量曲線に示す。温度上昇につれ、 $Mg(OH)_2$ はポリエチレン (PE) の分解温度の 430℃ より少し低い 340℃ で結晶水放出が認められたのに対し、 $Al(OH)_3$ の方はそれより遙かに低い 200℃ で結晶水放出が認められ、上記の仮説通りの結果を得た。(なお、仮に結晶水放出温度がポリエチレンの分解温度以上であると、ポリエチレンの分解物が燃焼して発生する熱量 (約 11,000 cal/g) に比べ、結晶水放出による吸熱量がせいぜい数 100 cal/g と小さいので、吸熱により燃焼を停止させることは期待できないことになるが、 $Al(OH)_3$ と $Mg(OH)_2$ は、ともに結晶水放出温度がポリエチレンの分解温度よりかなり低いため問題にはならない。) また、金属水和物の結晶水放出温度はポリエチレンの混合/成形温度 (200℃前後) 以上でなければならない。結晶水放出温度が 200℃ の $Al(OH)_3$ は、ポリエチレンの混合/成形温度と同じかその前後であるため、材料中に気泡 (ボイド) が発生するとともに、成形後の難燃性も低下することになる。

以上より、 $Al(OH)_3$ は、難燃特性で $Mg(OH)_2$ に若干劣ることの他に、ポリエチレンとの混合/成形時に気泡 (ボイド) 発生が懸念されるので候補から外すことにした。

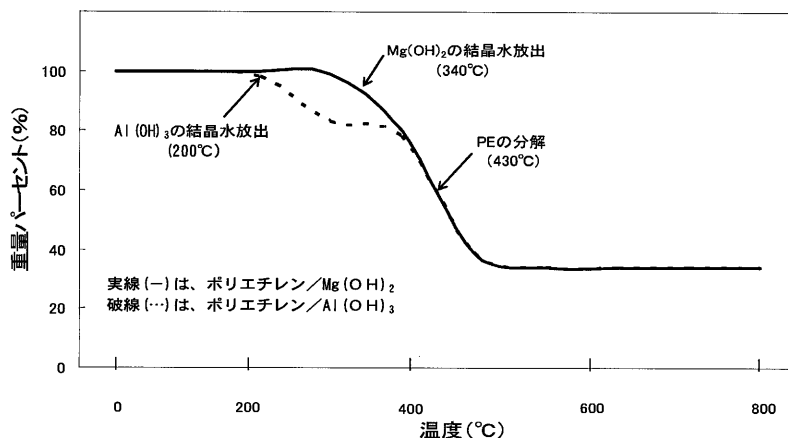


図 1.1.5 金属水和物充填ポリエチレン組成物の加熱減量曲線

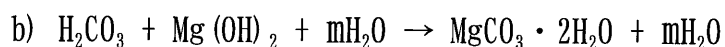
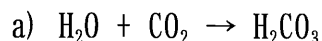
1. 4 エコ電線の 2 層被覆構造化の検討

1. 4. 1 水酸化マグネシウム高充填の問題点

水酸化マグネシウムをある程度以上に高充填すると、以下のような 4 つの問題となる現象が発生する。

(1) 白化現象

難燃剤として水マグを多量に充填した樹脂は、水と二酸化炭素 CO_2 とにより樹脂表面に白化現象を起こすことがある。白化は、結露した水の中に空気中の CO_2 が溶解込み、その結果生じた炭酸水 H_2CO_3 が樹脂中の水マグ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ と反応して炭酸マグネシウム MgCO_3 を生成、それが電線表面に白色の斑点になって析出し、あたかも電線の発熱により焼損したような様相を呈する。会田らの報告²⁾では、この現象は次の化学反応式で記述されると述べている。



これは、水への溶解度が $\text{Mg}(\text{OH})_2$ よりも MgCO_3 の方が大きいことから起こるもので、両者の 25℃ における水への溶解度はそれぞれ、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$: 240 mg/ℓ、 $\text{MgCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: 1,520 mg/ℓ である。

(2) 絶縁抵抗低下現象 (アルカリ性水溶液中)

白化現象は水マグ固有の問題であるが、その他に、樹脂に充填剤を多量入れた場合にはアルカリ性水溶液浸漬時の絶縁抵抗低下現象の問題がある。実際に、炭酸カルシウム CaCO_3 高充填配合の IV 電線 (PVC 絶縁電線) がコンクリート養生

水 (pH=12~13 程度) 中で長期使用後に絶縁低下を起こしたが、この現象は樹脂中の充填剤がアルカリ水溶液中に流出し、その後の樹脂中空隙部に水が入り込み樹脂の有効絶縁厚みが小さくなり絶縁抵抗が低下するもので、これはアルカリ度が高いほど顕著に起こる。

(3) ‘汗’ をかく現象 (酸性雰囲気中)

会田らの報告²⁾では、高温多湿の場所に水マグ高充填配合のエコ電線を揮発性の酸性薬品と一緒に長時間放置したところ、電線表面が‘汗’をかくという現象が起こったと記述している。また、1 wt% の酢酸水溶液に水マグ高充填配合の電線サンプルを下半分の長さ浸漬させ、室温で 24 時間放置試験をしたところ、電線表面が大量に‘汗’をかき、一方、同時に試験した水酸化アルミニウム高充填配合の電線サンプルにはそのような現象は全く見られなかったと報告されている。

(4) 沿面フラッシュオーバー現象 (オゾン雰囲気中)

水マグ高充填ポリエチレン絶縁の電力ケーブルにおいて、端末部で沿面方向 (長さ方向) の絶縁を確保していたものが、高電圧印加により部分放電が続き、局部的電界集中により 14.2 kV/mm の電界強度でフラッシュオーバー事故を起こした。その原因は次の通りである。まず、課電による部分放電でオゾン O_3 が発生し、それが気中の窒素と反応し NO_x を生成する。次に、その NO_x と絶縁体表面の水マグが反応して硝酸マグネシウム $Mg(NO_3)_2$ を生成し、それが絶縁体表面に付着する。この硝酸マグネシウムは潮解性のため、付着量が一定量以上になると沿面絶縁抵抗が低下し、漏れ電流が増加し、最終的に沿面絶縁破壊に至った。

1. 4. 2 2 層被覆構造化による対策

(1) 2 層被覆構造の開発

上記の 4 つの現象は、全て電線表面近くに存在する水マグが周りの環境にさらされていることにより起こることから、この対策は電線表面部分の水マグ充填量をゼロにするか又は極力少なくすることで解決できる。そこで、「水マグを多量に充填した内層と、その表面の薄い外層 (フルコーティング層と言う) とかなる 2 層被覆構造にした上で、その外層の水マグ配合部数を極力少なくする」ことを考えた⁸⁾。ただし、この構造では外部からの火炎に対し燃えやすくなり、難燃性が低下することが予想されたので、標準的導体サイズの電線 (60 mm²、総被覆厚 1.5 mm) を対象に、外層 (フルコーティング層) の厚さとその水マグ配合部数の関係を難燃性の観点から検討した。

まず、C8-LLDPE に難燃剤 $Mg(OH)_2$ を 140 部配合したもので内層被覆を形成した後、LLDPE に $Mg(OH)_2$ を 20 部配合したものと 100 部配合したものを用意し、

これらで厚さの異なる外層被覆を形成した。そして、電線の表面に炎を接触させる難燃性試験 (JIS C 3005 に規定の「60 度傾斜試験」) で評価を行った。「難燃性」の目安は、着火した電線の炎が火源除去後 1 分で自然消火することとした。試験結果を図 1.1.6 に示す。これより、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ の配合部数が 20 部で被覆厚が 0.2 mm のもの、配合部数が 100 部で被覆厚が 0.3 mm のもの、それぞれともに約 1 分で自然消火することがわかった。

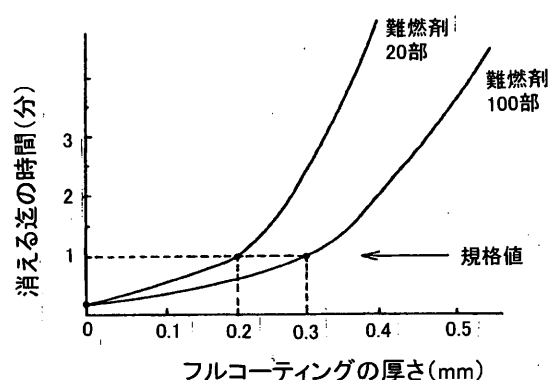


図 1.1.6 外層被覆 (フルコーティング) 厚と難燃特性の関係 ⁸⁾

次に、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ の配合部数による電線表面の白化現象への影響を検討した。まず、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ の配合部数の異なる 8 種の LLDPE 樹脂サンプルを用意し、それらで外層被覆厚 0.2 mm の電線を試作し、耐炭酸ガス白化促進試験を行った。試験は、シャーレに水と試験片を入れて CO_2 雰囲気下に置く水中法にて行い、4 週間後の試験片表面の白化状態を目視観察して評価した。試験結果を表 1.1.2 に示す。白化による表面状態を表す記号は、××は白化が最もひどく、順次 ×、△、○、◎ と良くなる。◎は白化が全くない状態を表す。図 1.1.7 の写真は表面白化状態の程度 (×判定の例) を示す。

表 1.1.2 表面白化状態の判定評価

| $\text{Mg}(\text{OH})_2$ の 配合部数 | 表面白化 状態 |
|------------------------------------|------------|
| 0 | ◎ |
| 20 | ◎ |
| 40 | ○ |
| 60 | ○ |
| 80 | ○ |
| 100 | △ |
| 120 | × |
| 140 | ×× |

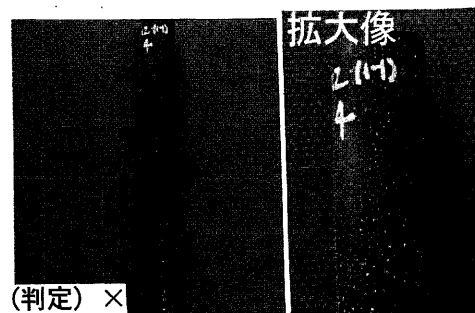


図 1.1.7 MgCO_3 による表面白化状態の程度 (例)

以上の難燃性試験結果 (図 1.1.6) と耐炭酸ガス白化促進試験結果 (表 1.1.2) から、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ の配合部数が 20 部で、厚さが 0.2 mm のフルコーティング層を設けることで、難燃性と耐白化性の両方を兼ね備えた電線が得られることがわかった。さらに、極端な試みとして、難燃剤の入っていない LLDPE でフルコーティング層を形成したサンプル電線に対して、同様の難燃性試験を行った。フルコーティング層厚は、0.3 mm、0.2 mm、0.1 mm の 3 種を試作した。なお、0.1 mm 厚は工業的に押出加工できる限界値である。試験結果は、0.3 mm のものは自然消火するのに約 3 分かかり、0.2 mm のものは約 2 分 30 秒かかったが、0.1 mm のものは予想に反し 20 秒強で自然消火した。これは、難燃剤が入ってなくても 0.1 mm の薄い LLDPE 層なら、それは材料のボリュームが燃焼を拡げる程の量でないがためと考えられる。

(2) 2層被覆構造化による効果

2層被覆構造化による絶縁抵抗低下の阻止効果を確認するため、導体サイズ 2 mm^2 で絶縁厚 1.0 mm の 3 種のエコ電線サンプル (EM—IE) と、比較のための PVC 絶縁電線サンプル (IV) の計 4 種サンプルを用意し、アルカリ水溶液 (3%NaOH 水、 $\text{PH}=14$) 中における長期浸漬後の絶縁抵抗値測定実験を行った。この実験で、細いサイズ (2 mm^2) の電線を使ったのは、絶縁抵抗低下現象が殆どすべて細い電線で起こるからであり、その理由は絶縁厚が 1.0 mm と薄いためと考えられる。因みに、太いサイズ (60 mm^2) の場合の絶縁厚は 1.5 mm である。

実験の結果を 表 1.1.3 に示す。なお、供試サンプル 4 種の被覆材料の配合組成は次の通りである。(①～③は EM—IE、④は IV)

- ① EVA 100 部 + $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 70 部
- ② C8-LLDPE 100 部 + $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 140 部
- ③ ②の表面に難燃剤の入っていない LLDPE でフルコーティング層 (0.1mm 厚) を形成した 2 層被覆構造
- ④ PVC (充填剤 CaCO_3 30 部入り)

表 1.1.3 アルカリ水溶液中における絶縁抵抗の変化

| | 絶縁抵抗値 (MΩ・km) | | | | | | |
|-------------------------------------|---------------|------|------|------|------|------|------|
| | 7日後 | 14日後 | 21日後 | 28日後 | 35日後 | 50日後 | 75日後 |
| ①EM-IE (EVA+70部) | 200 | 190 | 205 | 185 | 100 | 0 | 0 |
| ②EM-IE (C8-LLDPE+140部) | 820 | 800 | 850 | 635 | 495 | 205 | 0 |
| ③EM-IE (2層構造) (②の表面にポリエチレン層) | 830 | 815 | 835 | 795 | 830 | 825 | 830 |
| ④IV (CaCO ₃ 30部入りPVC) | 505 | 500 | 440 | 480 | 385 | 420 | 250 |

表中のサンプル①、②、④のデータより、ベース樹脂の違いに関係なく充填剤を多量入れることで絶縁抵抗低下現象を起こすことがわかった。また、サンプル②、③のデータ比較より、僅か 0.1 mm のフルコーティング層を持つ 2 層被覆構造にすることで、絶縁抵抗低下を完全に阻止できることがわかった。なお、サンプル①と②のデータ比較で、充填剤量が半分で少ないにもかかわらず、LLDPE に比べ EVA の方の絶縁抵抗値は低く、かつ、その低下が速く進むという結果から、EVA は電気絶縁特性面ではかなり劣る材料であるという知見も得られた。

‘汗’をかく現象については、1 wt% の酢酸水溶液に、上記のサンプル①、②、③ を下半分の長さ浸漬させ、室温で 24 時間放置試験を行った。結果は、サンプル②は電線表面がびしょりと‘汗’をかき、サンプル①も僅かに‘汗’をかけたのに対し、2 層構造のサンプル③は全く‘汗’をかかなかった。これより、僅か 0.1 mm のフルコーティング層がこの現象の対策に有効であることがわかった。

沿面フラッシュオーバー現象についても、Mg(OH)₂の入っていないフルコーティング層で電線表面を覆っているため、NO_xと水マグの反応は生じなくなることより、結果的に潮解性の Mg(NO₃)₂の生成はなくなり、フラッシュオーバー現象は起こらないと考えられる。

1. 5 あとがき

本章では、ベース樹脂にメタロセン C8-LLDPE を選定し、それに難燃剤の水マグを高充填することで、加熱変形しにくく、難燃性かつ加工性に優れたエコ電線が実現できた。同時に、水マグによる難燃性付与メカニズムについても解明した。また、2 層被覆構造にすることで、水マグ高充填による 4 つの実使用上の

問題点が解決できることを実験で確認した。この 2 層被覆構造はエコ電線の設計指針にも取り入れられうるもので、エコ電線の品質向上に寄与すると考える。

参考文献

- 1) Mamoru KONDO, Yasuo TORIUMI, Takahisa HIURA, Kazuhiko MASUO, Toshio MORISHITA, Yasuyuki KAWAMOTO, Koujiro ISHISE : “ Development of Non-Halogen Flame-Retardant Wires & Cables ” , Sumitomo Electric Technical Review, Number 24, pp.108～116 (1985)
- 2) 会田二三夫、瀬田寧、川端秀雄ほか：「エコ材料の最先端」、(株)エヌ・ティー・エス、p. 99、p. 159、pp. 172～173 (2004)
- 3) 小林裕、益尾和彦：「難燃性ポリオレフィン樹脂組成物」、特許公報、特許第 3019840 号（登録日 2000. 1. 7）
- 4) 小林裕、益尾和彦：「難燃性ポリオレフィン樹脂組成物」、特許公報、特許第 3055551 号（登録日 2000. 4. 14）
- 5) 小林裕、益尾和彦：「難燃性ポリオレフィン樹脂組成物」、特許公報、特許第 3063759 号（登録日 2000. 5. 12）
- 6) 水谷照吉、石岡貢ほか：「メタロセン系低密度ポリエチレンの電力ケーブル絶縁材料への適用の可能性についての一考察」、電気学会論文集 B、Vol. 121、No. 3 (2001)
- 7) 東川善文、小林裕、奥見慎祐ほか：「地球環境への影響を低減したエコケーブル」、電気学会 電線・ケーブル研究会、MID-99-12 (1999)
- 8) 益尾和彦、山崎直哉：「難燃性ポリオレフィン系樹脂被覆の電線ケーブル」、公開特許公報、特開平 10-228819（出願日 1998. 8. 25）

第2章 エコ電線の難燃性材料への天然水酸化マグネシウム適用と

赤リン添加によるその充填量低減

2. 1 まえがき

序論で述べた通り、エコ電線は当初の脱塩化ビニルという目的は果たしたものの、環境負荷（製造時 CO_2 排出量）の面では、塩化ビニル電線に比べさほど優位でない。

本章では、まずエコ電線用コンパウンド（エコマテリアル）中に難燃剤として多量充填されている水酸化マグネシウム（以下、水マグと言う）の製造時 CO_2 排出量が、電線全体の製造時総 CO_2 排出量の約 15% ¹⁾ を占めるほどに過大であることに着目し、水マグを従来の合成品（製造時エネルギー消費量大）から天然品（製造時エネルギー消費量小）に替えることによる CO_2 排出量の大幅削減の可能性について検討する。一方で、天然品は合成品に比べ粒子径が不均一でかつ大きく、さらに吸湿性が高く、これをそのまま充填しても満足なエコマテリアルは得られないため、その対策を検討する。また、難燃性を高める効果を有する赤リンを添加することの効果について実験的に検証する。最後に、水マグを合成品から天然品に替え、かつ赤リン添加により水マグ充填量を極限にまで低減することによる電線全体の製造時 CO_2 排出量削減の可能性について、LCA 分析により確認する。

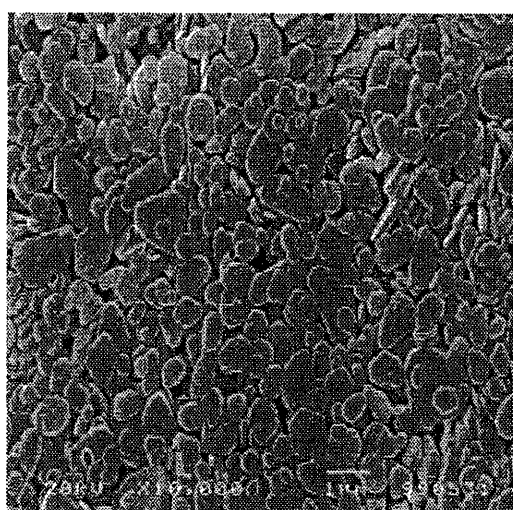
2. 2 天然水酸化マグネシウムの微粉碎と高吸湿性の原因究明

水マグ（化学式： $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ）には合成品と天然品がある。合成品は、海水に消石灰を投入し合成・蒸発する製法が一般的で、粒径が小さく（ $1.0 \sim 2.0 \mu\text{m}$ ）かつ均一で不純物を含まず、難燃剤として特に支障なく使用されてきた。（図 1.2.1 (a) 参照）一方の天然品は、天然鉱物から採取されるため、粒径が大きく（約 $4.0 \mu\text{m}$ ）かつ不均一で、加工性や難燃特性が合成品より格段に劣るという欠点を持つ。さらに、天然品は吸湿性が高く、これを充填したコンパウンドは高湿度空气中に放置すると水分を吸収し、電線被覆加工する際に押出機内で水分が発泡しボイドを形成するという問題がある。（合成品は天然品に比べ低吸湿性であるため、ボイド形成の問題は殆どない。）

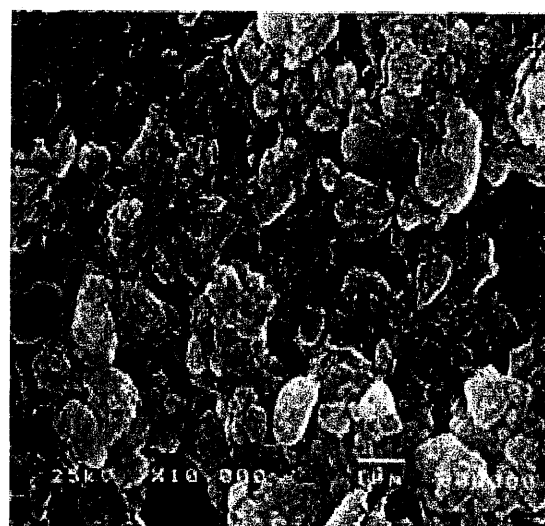
これらの問題の解決を目指して、難燃剤メーカーの協力を得て天然品の粉碎を試みた。目標平均粒径は合成品と同じ $2.0 \mu\text{m}$ 以下とした。大きな石の塊を一

度にミクロンオーダーまで細かくできないため、粗砕(数10 cm→10数 cm→数 cm)、中砕(数 cm→数 mm)、微粉碎(数 mm→数 μ m)の3段階のプロセスで粉碎を行い、最終的に平均粒径1.9 μ mを実現した。(図1.2.1(b)参照)

また、ベース樹脂メーカーの基礎データ²⁾(表1.2.1)より、粒径が小さいほど酸素指数(O.I.)が高くなること、および粒径が同じなら合成品も天然品も同じO.I.値を示すことがわかった。つまり、粒径を最小(各粒子の表面積の総和を最大)にすることで、水マグの難燃性付与効果が最大になるという知見を得た。



(a) 合成水マグ 1 μ m



(b) 天然水マグ 1 μ m

図1.2.1 合成水マグと微粉碎後の天然水マグのSEM写真²⁾

表1.2.1 水マグの粒径と酸素指数(O.I.)の関係²⁾

| 水マグ平均粒径 | | EEA(100部)+ 水マグ(125部) | EEA(100部)+ 水マグ(150部) |
|---------|-------------|-------------------------|-------------------------|
| 天然品 | 4.0 μ m | O.I.=26.0 | O.I.=27.0 |
| | 2.0 μ m | O.I.=27.3 | O.I.=28.4 |
| 合成品 | 2.0 μ m | O.I.=27.2 | O.I.=28.5 |

天然水マグの吸湿性が高い原因を究明するために以下のような実験を行った。上記の平均粒径 $1.9\mu\text{m}$ の天然水マグ (未表面処理品) を 500 g 用意し、約 5 l の水に懸濁させ攪拌しながら、塩酸 (HCl) を溶液が $\text{pH}=2$ を下回らないように徐々に加え、最終的に $\text{pH}=2.5$ に調製した。これを静置して不溶成分を沈殿させ、上澄み液を捨て、濾過→洗浄→乾燥を経て、塩酸不溶成分を得た。この塩酸不溶成分と上記天然水マグを 150°C で 3 時間乾燥させ、それぞれ 1.5 g を $30^\circ\text{C}-90\text{ RH}$ の恒温恒湿状態に 24 時間放置した後、吸湿による重量増加率を測定した。測定結果は 図 1.2.2 に示す通りで、天然水マグより抽出した塩酸不溶成分 (水マグ以外の成分、以下不純物と言う) は、天然水マグの約 3 倍の重量増加率を有することがわかった。つまり、天然水マグで認められた吸湿性は、その中に含まれる不純物の影響の大きいことが明らかとなった。

なお、難燃剤メーカーの調査で、この不純物は二酸化珪素と酸化マグネシウムとに富んでおり、今回の検討に用いた中国産ブルーサイトに由来する天然水マグの場合は、約 3.6% 含有しているとの結果を得た。

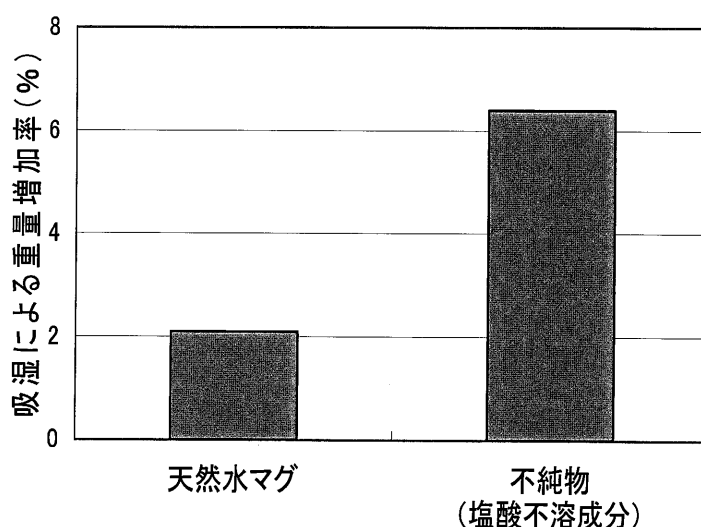


図 1.2.2 不純物 (塩酸不溶成分) の吸湿性

2. 3 乾式表面処理による天然水酸化マグネシウムの吸湿性低減

2. 3. 1 乾式表面処理と吸湿性試験

前節で述べた天然水マグの吸湿性の低減策として、外部からの水分を遮断するために、ステアリン酸等の脂肪酸により天然水マグに表面処理を施すこと

を考える。これらの処理剤は、樹脂と粉体の混合時に滑り性を上げるための滑剤として使用されるものであるが、今回、あらかじめ水マグ粉体の表面全体に処理剤を施すことで、吸湿阻止効果を目指す。所期の効果を得るためには、表面処理の過程で水分による悪影響を極力排除する必要がある。

粉体の表面処理の方法には、湿式粉碎の後に水中で表面処理する方法(湿式処理)と、乾式粉碎の後に乾式で表面処理する方法(乾式処理)とがあり、沢田ら³⁾は、合成水マグなど殆どの場合で湿式処理が行われていると報告している。しかし、天然水マグの場合、それ自体の吸湿性が高いため、大量の水分と直接長時間接触することになる湿式処理は好ましくなく、乾式処理の方が望ましい^{4), 5)}。そこで、表面処理方法の違い(湿式と乾式)による吸湿性の差異を実験で求めるため、供試サンプルとして、次の①～③に示す表面処理方法の異なる 3 種の天然水マグ粉体(平均粒径 $1.9\mu\text{m}$)を用意した。

- ①ステアリン酸を粉体に対し 2.5～3.0 % (粉体表面全体に施すための最適添加比率) 添加し、80℃で 2 時間水中にて攪拌した後、濾過を行い、その後 110℃で 7 時間乾燥を行って得た仕込量 1 kg のラボスケール評価サンプル(湿式ラボスケール品)
- ②ステアリン酸を粉体に対し 2.5～3.0 % 添加し、湿式で工業的に製造された仕込量 3 トンの評価サンプル(湿式工業生産品)
- ③ステアリン酸を粉体に対し 2.5～3.0 % 添加し、乾式で工業的に製造された仕込量 3 トンの評価サンプル(乾式工業生産品)

それぞれを 110℃で 24 時間乾燥処理を行った後、乾燥直後の水分量と、25℃—60RH の恒温恒湿状態に 1 週間放置した後の水分量を、カールフィッシャー法(加熱温度: 200℃)にて測定した。

測定結果は 図 1.2.3 に示す通りで、乾燥直後の水分量は、③の乾式工業生産品が最も小さく、湿式品は仕込量によらず乾式品より大きい値を示した。また、1 週間後の水分量も同様な傾向を示し、③の乾式工業生産品が 3100 ppm であるのに対し、②の湿式工業生産品は 5200 ppm であり、1.7 倍大きい値を示した。なお、1 週間後の吸収水分量はその値で飽和したことを確認している。

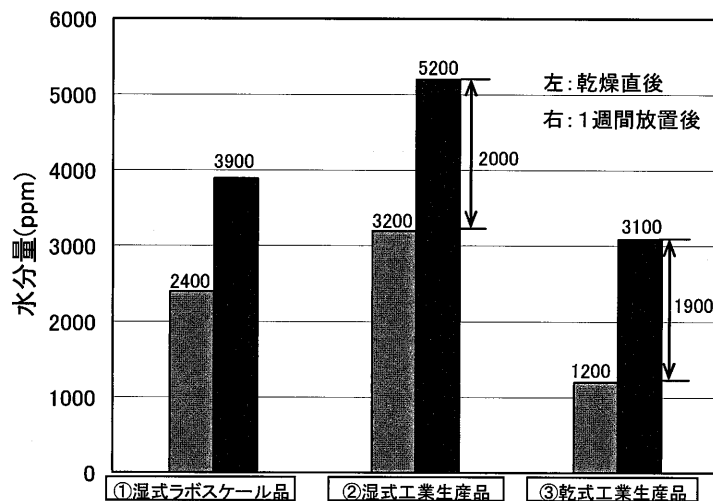


図 1.2.3 表面処理方法の違いによる吸収水分量の差異

この結果から次の通り考察できる。まず、乾燥直後における乾式品と湿式品の水分量の差は、湿式品は水中での表面処理の過程で‘裸’の天然水マグ粉体自体への水分吸収が促進されたためと考えられる。つまり、粉体自体への水分吸収が行われた後に脂肪酸による表面処理が行われるため、一旦吸収された水分は表面処理剤の影響で外部へ放出されにくくなったと考えられる。仕込量が大きくなるとこの傾向が助長され、工業生産品はラボスケール品より乾燥直後における水分量が大きくなったと推定できる。また、乾燥直後と1週間後の水分量の差が、②の湿式工業生産品では2000 ppm、③の乾式工業生産品では1900 ppm とほぼ同じことから、表面処理が終了した後の水分吸収量は、乾式品、湿式品に関係なく同じと考えられ、1週間後の到達水分量は乾燥直後における水分量、すなわち初期段階の保持水分量に依存するものと考えられる。

次に、電線被覆加工する際の天然水マグによるボイド形成の有無を実験で求めた。代表的ポリオレフィン系樹脂のEVA(エチレン酢酸ビニル共重合体)100部の中に、上記の1週間放置後の水マグサンプル①～③を100部充填し、150～200℃の高温で数10分オーダー混練りしてペレット状サンプルを作製し、そのサンプルを用いて切断面の顕微鏡(SEM)観察を行った。図1.2.4にSEM写真を示す。①の湿式ラボスケール品(1週間放置後の水分量3900 ppm)、および②の湿式工業生産品(同5200 ppm)では、ボイド形成(ボイド径:数10 μm)が著しいことがわかる。一方、③の乾式工業生産品(同3100 ppm)では、ボイド形成が認められず、湿式品との間の差異が明白となり、水分量が3900 ppmから3100 ppmへ小さくなると、ボイド形成問題はなくなることがわかった。このように、水分量がボイド形成に直接的に影響することがわかった。

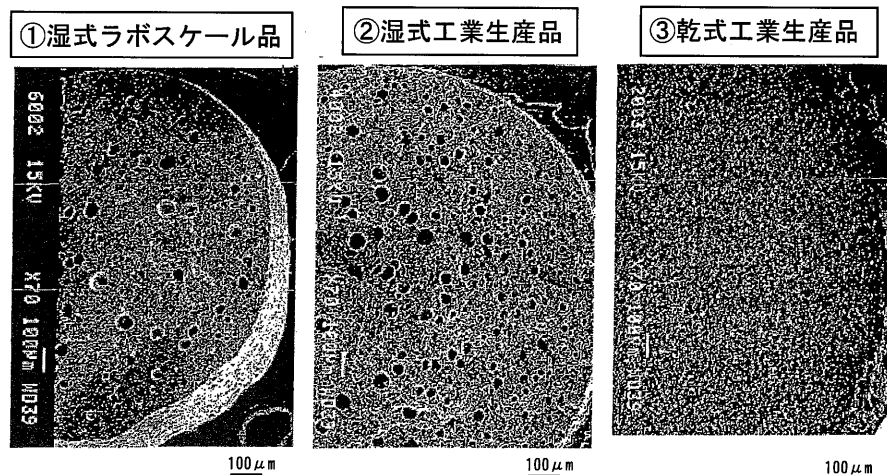


図 1. 2. 4 コンパウンドペレット断面の SEM 写真（ボイドの有無確認）

2. 3. 2 絶縁抵抗測定

天然水マグが吸湿しやすいために、それを充填したコンパウンドも吸湿しやすくなり、そのコンパウンドを絶縁体に使用した電線も使用中に吸湿が進み絶縁抵抗値が低下することが予想される。そこで、高温水槽中における浸漬実験によって絶縁抵抗を測定する。供試サンプルとして、前項の 1 週間放置後の水マグサンプル①～③を充填した 3 種のコンパウンドペレットを用い、加圧プレスにより 1 mm 厚のシートを作製した。試験は、促進のため 80℃に保温した高温水槽中にサンプルを浸漬し、所定時間浸漬後に採取し、JIS K 6723 の 6.8「体積抵抗率試験」に記載の方法に準じて、固有抵抗値 (20℃における) を測定した。なお、測定は、浸漬開始直前、12 時間後、24 時間後、48 時間後、96 時間後に行い、各々の測定サンプル数は 3 とした。

試験の結果を 図 1. 2. 5 に示す。試験開始後 24 時間までは、固有抵抗値の低下が①～③のサンプルすべてに認められる。これはサンプル中の水マグの吸湿がまず先行して進んだためと考えられる。24 時間を過ぎると、①と②の湿式品を用いたサンプルは、緩やかな固有抵抗値の低下が認められ、96 時間後においても飽和しなかった。これは、コンパウンド中に形成したボイドに水分が入り込み、その結果有効絶縁厚みが徐々に小さくなったためと考えられる。一方、③の乾式品を用いたサンプルは、24 時間を過ぎると固有抵抗値の低下は止まり、その後 $1.50 \times 10^{15} \sim 1.48 \times 10^{15} \Omega\text{-cm}$ の高いレベルで推移した。なお、③のサンプルについては 96 時間を過ぎても試験を継続した結果、120 時間後と 240 時間

後の固有抵抗値は、ともに 96 時間後の値 ($1.48 \times 10^{15} \Omega\text{-cm}$) と変化がなく、96 時間で飽和していることを確認した。

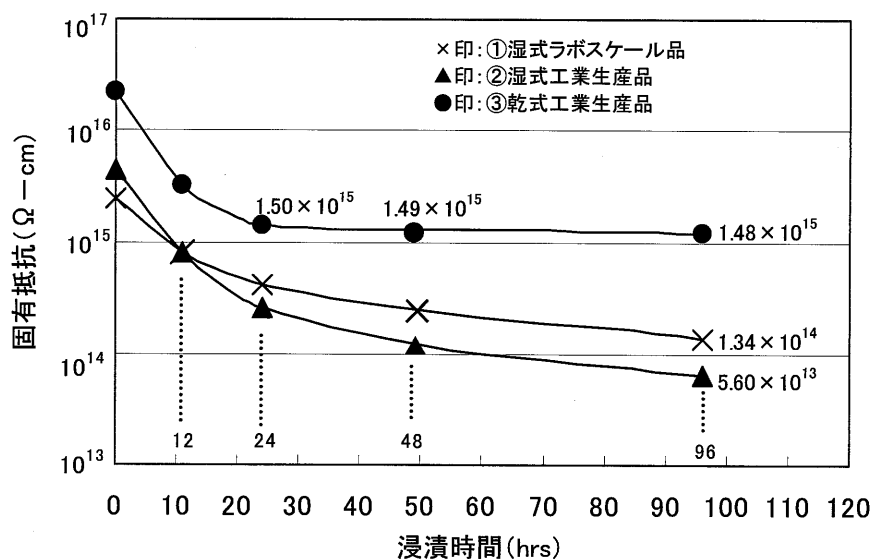


図 1.2.5 浸漬後の固有抵抗値の変化

次に、図 1.2.5 に示す 96 時間浸漬後の各サンプルの固有抵抗値をもとに、それらコンパウンドを絶縁体を使用した電線の絶縁抵抗値を算出した。電線は汎用エコ電線 EM-IE (耐燃性ポリエチレン絶縁電線) を対象とし、次の円筒形絶縁体の絶縁抵抗算出式を用い計算した。

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \log_e \frac{D}{d} \times 10^{-11} \quad \dots\dots\dots (1.2.1)$$

R : 20℃における電線の絶縁抵抗値 (MΩ-km)

ρ : 20℃におけるコンパウンドの固有抵抗値 (Ω-cm)

D : 絶縁体外径 (mm)

d : 絶縁体内径 (mm)

計算の結果は 表 1.2.2 に示す通りで、①の湿式ラボスケール品を用いた電線はすべての導体サイズで規格値 (JIS で規定) を満たすが、数値的に余裕がなく安全性の保証が難しいレベルであった。②の湿式工業生産品を用いた電線は、サイズが 3.5 mm² 以上では規格値を満たさないことがあることがわかった。③の乾式工業生産品を用いた電線は、規格値を満たすだけでなく数値的にも 1 桁以上高いレベルにあることがわかった。

表 1.2.2 浸漬後の絶縁抵抗値 (計算値)

| サイズ (mm ²) | 内径 (mm) | 外径 (mm) | 絶縁抵抗 (MΩ・km) | | | 規格値 |
|---------------------------|------------|------------|----------------|--------------|--------------|-----|
| | | | ①湿式ラボ スケール品 | ②湿式工業 生産品 | ③乾式工業 生産品 | |
| 0.9 | 1.2 | 2.8 | 181 | 76 | 1996 | 50 |
| 1.25 | 1.35 | 3.0 | 170 | 71 | 1881 | 50 |
| 2 | 1.8 | 3.4 | 136 | 57 | 1498 | 50 |
| 3.5 | 2.4 | 4.0 | 109 | 46 | 1203 | 50 |
| 5.5 | 3.0 | 5.0 | 109 | 46 | 1203 | 50 |
| 8 | 3.6 | 5.6 | 94 | 39 | 1041 | 50 |
| 14 | 4.8 | 6.8 | 74 | 31 | 821 | 40 |
| 22 | 6.0 | 8.4 | 72 | 30 | 793 | 40 |
| 38 | 7.8 | 10.5 | 63 | 26 | 700 | 40 |
| 60 | 10.0 | 13.0 | 56 | 23 | 618 | 30 |
| 100 | 13.0 | 17.0 | 57 | 24 | 632 | 30 |
| 150 | 16.1 | 20.1 | 47 | 20 | 523 | 20 |
| 200 | 18.2 | 23.2 | 52 | 22 | 572 | 20 |
| 250 | 20.7 | 25.7 | 46 | 19 | 510 | 20 |
| 325 | 23.4 | 28.4 | 41 | 17 | 456 | 20 |
| 400 | 26.1 | 31.1 | 37 | 16 | 413 | 20 |
| 500 | 28.8 | 34.8 | 40 | 17 | 446 | 20 |

(注) 網掛け部分は規格値を満たさないことを示す。

2. 4 赤リン添加による水酸化マグネシウム充填量の低減

2. 4. 1 赤リン添加と難燃性試験

第1章で、水マグは結晶水の放出による吸熱作用によりポリエチレンに難燃性を付与し、その結晶水放出温度(340℃)がポリエチレンの分解温度(430℃)にかなり近いいため、効率的に燃焼を阻止することを述べた。また、ポリオレフィン系樹脂に高難燃性を付与するためには、樹脂100部に対し水マグを140部充填する必要のあることを述べた。

一方、従来から、ポリオレフィン系樹脂に赤リンを少量添加すると難燃性が高くなることが知られている。武田、西原ら⁶⁾は、ポリエステル(PET)中に赤リンを増量していった時の酸素指数(0. I.)の変化を実験で求めている。その結果、図1.2.6の●印と実線で示した通り、0. I. 値は赤リン含有量(wt%)の平方根に比例して高くなるという法則性を得たと報告している。また、赤リンは、樹脂の表面に炭化層を形成させる触媒または反応媒体としての機能をもち、その炭化層による酸素遮断効果により難燃性を付与するとの見解を示した上で、ポリアクリロニトリルを用いた熱分解実験により、赤リン含有量と熱分解後の炭化残渣量との間に関係が見られ、赤リンが増大するとともに炭化残渣量は増大すると報告している。

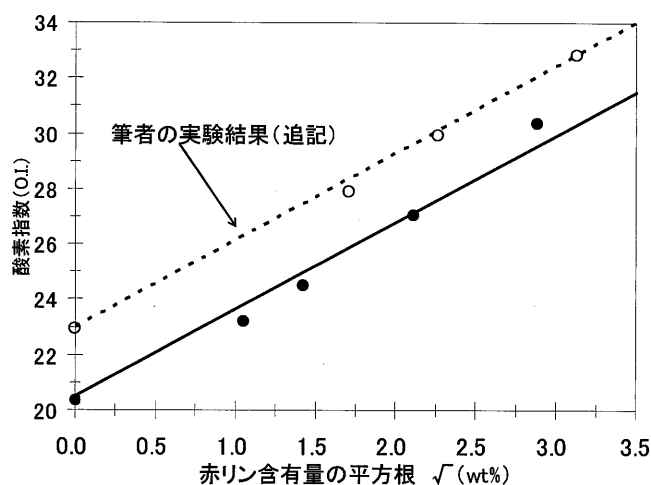


図 1.2.6 赤リン含有量と酸素指数 (O. I.) の関係 7)

このように、水マグは結晶水放出による吸熱作用により難燃性を付与するのに対し、赤リンは炭化層形成による酸素遮断作用により難燃性を付与する。この難燃性付与メカニズムの相違から、赤リンを少量添加することによって、高難燃性を保ったまま、水マグ充填量を低減できる可能性について検討した。即ち、水マグを 80 部充填した O. I. =23 (やや難燃性レベル) のコンパウンド中に、赤リンを増量添加した時の難燃性の変化を実験で求めるため、以下の (1) ~ (5) に示すコンパウンドをシースにもつ 5 種の制御用エコ電線 EM-CEE 3×5.5 mm² (外径 14 mm) を試作した。このシースコンパウンドのベース樹脂には、細径、軽量の制御用であることを考慮し、柔軟性のある EEA (エチレンアクリル酸エチル共重合体) を用い、絶縁体には、一般的に使用される LDPE (低密度ポリエチレン) を用いた。

- (1) EEA 100 部+天然水マグ 80 部
- (2) EEA 100 部+天然水マグ 80 部+赤リン 3 部
- (3) EEA 100 部+天然水マグ 80 部+赤リン 5 部
- (4) EEA 100 部+天然水マグ 80 部+赤リン 10 部
- (5) EEA 100 部+天然水マグ 140 部 (比較用サンプル)

難燃性の評価には、酸素指数 (O. I.) 試験 (JIS K 7201) と 60 度傾斜試験 (JIS C 3005) のほかに、垂直トレイ (VOT) 試験 (IEEE 383) の 3 つの試験を行った。VOT 試験は、多条垂直布設した電線に下方にてガスバーナで着火し、上方に燃焼が進んだ後、自然鎮火するまでの時間と焼損長で、その電線の難燃性を評価するものである。また、シース片から採取したダンベル状サンプルを用い、引張

強度、伸び、100%モジュラスを測定した。(100%モジュラスとは、伸び 100%時点での引張強度を示し、柔軟性の評価に一般的に用いられ、その値が小さいほど柔軟性に優れる。) 試験の結果を表 1.2.3 に示す。3 つの難燃性試験の合否判定は、それぞれ、「0. I. は 21 以上」、「60 度傾斜は 1 分以内に自然消火すること」、「VOT は上端迄燃焼しないこと」を目安とし、表中に合格レベルは ○印、不合格レベルは ×印で示した。試験の結果、次のことがわかった。

- ① サンプル (1) ～ (3) のデータ比較より、高難燃性 (3 つの難燃性試験全てに合格するレベル) を得るには、水マグ 80 部に赤リン 5 部を添加する必要がある。
- ② サンプル (4) のデータより、赤リン 10 部を添加しても、難燃性は殆ど向上せず、逆に、引張強度、伸びともに低下する。
- ③ サンプル (3) とサンプル (5) のデータ比較より、難燃性のほか、引張強度、伸び、100%モジュラスの全てで、サンプル (3) の方が僅かに優れていることから、赤リン 5 部を添加すると、結果的に水マグ充填量を 140 部から 80 部までほぼ半減できることになる。

表 1.2.3 各種赤リン添加エコ電線の特性試験結果

| | | (1) 水マグ80部 (赤リンゼロ) | (2) 水マグ80部 赤リン3部 | (3) 水マグ80部 赤リン5部 | (4) 水マグ80部 赤リン10部 | (5) 水マグ140部 (赤リンゼロ) |
|---------------------------------|-----------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 難燃性 | 酸素指数 (O.I.) | 23 ○ | 28 ○ | 30 ○ | 33 ○ | 28 ○ |
| | 60度傾斜 (火源除去後消火時間) | 燃焼継続 × | 自然消火 (5秒) ○ | 自然消火 (3秒) ○ | 自然消火 (2～3秒) ○ | 自然消火 (10秒) ○ |
| | 垂直トレイ (VOT) (焼損長さ) | 10分後 上端迄燃焼 (170cm以上) × | 60分後 上端迄燃焼 (170cm以上) × | 25分後鎮火 (90cm) ○ | 25分後鎮火 (90cm) ○ | 30分後鎮火 (140cm) ○ |
| 引張強度 (kg/mm ²) | | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.0 | 0.8 |
| 伸び (%) | | 600 | 600 | 600 | 550 | 400 |
| 100%モジュラス (kg/mm ²) | | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.7 |

ここで、赤リン添加量を、ベース樹脂 100 部に対し 0 部→3 部→5 部→10 部と増大すると、0. I. 値は 23→28→30→33 と高くなることがわかる。これらの値を

前掲の 図 1.2.6 のグラフ中に ○印でプロットしたところ、各プロット点は、図中の破線で示す通りほぼ直線で結ぶことができた。これより、O. I. 値は、赤リン添加前の初期値を基点として、赤リン添加によりその含有量 (wt%) の平方根に比例して高くなり、かつその傾きはベース樹脂（この例の場合、PET と EEA）の種類に拘わらず同じであるとの知見が得られた。

2. 4. 2 VOT 試験

サンプル (3) を用いた VOT 試験の結果を 図 1.2.7 に示す。図 1.2.7 (下段) の図と写真に示す通り、着火後 10 分、15 分、20 分は燃焼が進み、20 分後をピークに燃焼は下火になり始め、25 分後に鎮火した。焼損長 (a 点から焼損端 d 点までの距離) は 90 cm であった。また、鎮火後の焼損端部分 (図 1.2.7 (上段) の拡大写真) の詳細な解体観察により、燃え殻(炭化層)が確実に残っており酸素遮断作用のあったことが確認できた。なお、図中 a~e は熱電対による温度測定点を示し、20 分後の燃焼ピーク時における各点の温度は、その測定値は著しく変動したが、おおよそ a = 800℃、b = 600℃、c = 500℃、d = 350~400℃、e = 100~150℃ であった。

本試験における燃焼から鎮火にいたるプロセスは以下のように説明できる。a、b、c の各点温度は、電線被覆樹脂 (EEA や LDPE) の分解温度 (430℃) よりはるかに高い値になっている。これは、樹脂の分解により生じた可燃性ガスが着火・燃焼を連鎖的に起こしながら、燃焼が上方に拡大していったことを示している。燃焼がピークから下火になり始めた d 点 (焼損端) の温度は 350~400℃で、樹脂の分解温度 (430℃) より僅かに低い値になっている。これは、この部分で、水マグの結晶水放出 (放出温度 340℃) による吸熱作用と、赤リンによりできた炭化層による酸素遮断作用の両方が有効に効き、温度上昇が阻止され 430℃にまで上がらず、その結果燃焼が下火から鎮火に向かったことを示している。

2. 4. 3 赤リンの安全性

赤リンは、難燃効果が大きくかつ添加量が少なくすむなど理想的な難燃剤であるが、一方で、空気中の水と反応して毒性のホスフィン (PH_3) 生成の懸念が指摘されてきた。そこで、電線の押出製造時と火災燃焼時でのホスフィンによる健康面の安全性に関し、文献調査をもとに考察する。

押出製造時の安全性については、赤リンが添加された電線被覆材料は、押出被覆時の加熱により微量のホスフィンが発生することがあり、かつ、ホスフィンの健康面の許容濃度 0.3 ppm に対し、押出機ダイス直近で許容濃度を上回る

ホスフィンを検出したという実験データ⁸⁾もあることから、局所排気設備を設け、より安全性を高めておくことが絶対条件である。また、ホスフィンは大気中では不安定な物質であり、水分やオゾンなどと比較的速やかに反応しオキソ酸（無害）になるので⁹⁾、排気後は問題ないと考えてよい。

火災燃焼時の安全性については、赤リン 1 mg 燃焼時のホスフィン発生量は、燃焼条件で異なるが、おおよそ数 10 ppm オーダーである。火災時における各種ガスの発生量とその毒性のデータ¹⁰⁾をもとに試算した結果、ホスフィンの相対毒性は一酸化炭素(CO)の1/8~1/30のレベルであり、また塩ビ(PVC)やポリアミド(ナイロン)が燃焼した場合に発生する塩化水素(HCl)やシアン化水素(HCN)に比べても低いレベルであると報告されている。従って、電線被覆材料に赤リンが添加されたことで、火災時に発生するホスフィンの毒性によって人体への危険性が顕著に増加することはないと考えてよい。

以上の通り、エコ電線に赤リンを使用するにあたっての健康面の安全性に関し一定の結論を得た。

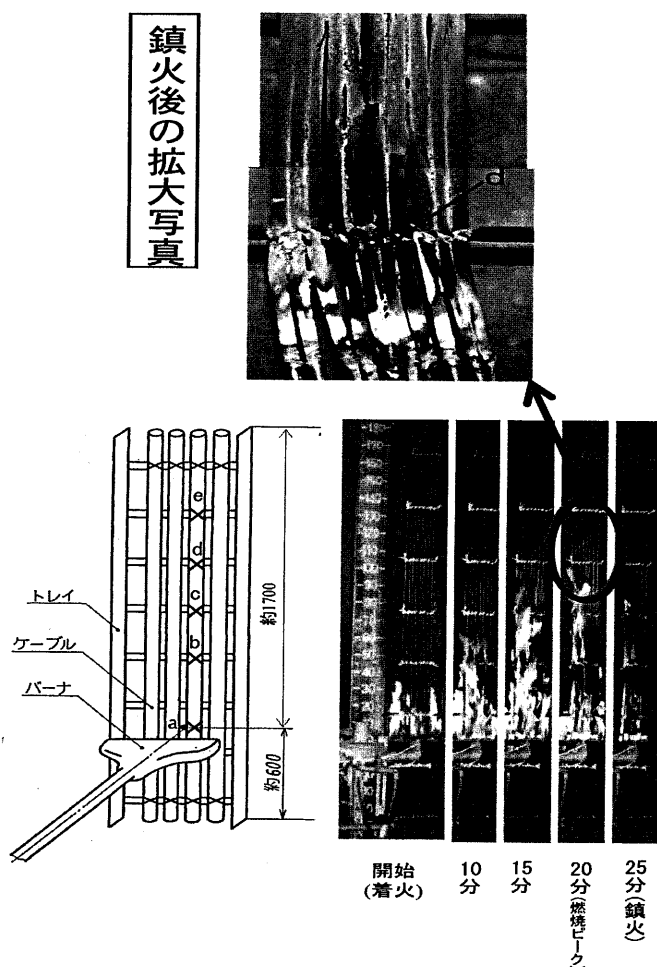
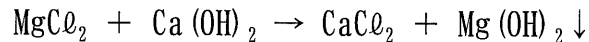


図 1.2.7 赤リン添加エコ電線の垂直トレイ (VOT) 試験

2. 5 CO₂排出量削減効果の検討

本節では、合成水マグと天然水マグそれぞれの製造時における消費エネルギーから製造時における CO₂ 排出量を求めて比較検討する。合成水マグは、海水に含まれる MgCl₂（にがり）を原料とし、海水に Ca(OH)₂（消石灰）を投入し、次の化学式で示す沈殿反応により製造され、沈殿した Mg(OH)₂（水マグ）は濃縮されスラリー状態（コンデンスミルクのような状態）になった後、乾燥機で乾燥される。



乾燥は高温で行うと水マグが結晶水放出を起こす可能性があるため、比較的低い温度で長時間かけ行われる。このように合成水マグはその製造にあたり、石灰石を焼いて消石灰を作る工程、および、消石灰と海水との合成後の乾燥工程で、主として熱エネルギーを大量に消費する。

一方、天然水マグは、中国等で採取されるブルーサイトという水マグが主成分の天然鉱物を原料としており、中国から日本までの輸送と国内での粉碎・表面処理工程で、主として動力エネルギーの少量消費ですむ。その結果、合成水マグと天然水マグそれぞれの単位重量当たりの製造時 CO₂ 排出量は、(社)電線総合技術センター (JECTEC) のデータ¹¹⁾によると、合成：1.216 CO₂-kg/kg、天然：0.150 CO₂-kg/kg であり、天然水マグは合成水マグの 1/8 程度と非常に小さい。

筆者は、代表的サイズの電線（制御用 3×2 mm²）を対象として、ライフサイクルアセスメント（LCA）分析により、塩ビ電線（CVV）と従来型エコ電線（EM-CEE、合成水マグ 140 部）それぞれの製造時 CO₂ 排出量を試算した¹²⁾。その結果を説明のために表 1.2.4 に掲げる。前述の水マグを合成品から天然品に替え、かつ赤リン添加により水マグ充填量をほぼ半減させたエコ電線（EM-CEE、天然水マグ 80 部）について、同じ計算条件で製造時 CO₂ 排出量を試算し、結果を表 1.2.4 の中に追記した。追記部分は（ ）付きで示している。なお、赤リンについては、添加量が少ないので計算では無視している。

これより、電線 1 km あたりの製造時 CO₂ 排出量は、CVV が 271 CO₂-kg であるのに対し、従来型 EM-CEE は 252 CO₂-kg（CVV に対し 7 % の削減）、赤リン添加 EM-CEE は 214 CO₂-kg（CVV に対し 21% の削減）となり、赤リン添加 EM-CEE は、その製造時 CO₂ 排出量が、CVV や従来型 EM-CEE に比べ小さくなることが確認できた。

表 1.2.4 塩ビ電線とエコ電線の製造時 CO₂ 排出量 ¹²⁾

| | 投入素材 | | 投入量 | CO ₂ 排出量 CO ₂ -kg | |
|------------------------------|-------------|------|---------|---|---------|
| | 素材名 | 単位 | 1km製造当り | 単用量当り | 1km製造当り |
| CVV 3×2mm ² | 銅 | kg | 54 | 1.248 | 67 |
| | ビニル | kg | 48 | 1.711 | 82 |
| | DOP可塑剤 | kg | 24 | 1.826 | 44 |
| | ポリプロピレン: 介在 | kg | 9 | 0.964 | 9 |
| | 木製ドラム | kg | 25 | 0.103 | 3 |
| | 電力 | kW・h | 157 | 0.422 | 66 |
| | 合計 | | | | 271 |
| EM-CEE 3×2mm ² | 銅 | kg | 54 | 1.248 | 67 |
| | ポリエチレン | kg | 20 | 1.498 | 30 |
| | ポリプロピレン: 介在 | kg | 9 | 0.964 | 9 |
| | ポリオレフィン | kg | 24 | 1.498 | 36 |
| | 合成水マグ 140部 | kg | 34 | 1.216 | 41 |
| | (天然水マグ 80部) | (kg) | (19) | (0.150) | (3) |
| | 木製ドラム | kg | 25 | 0.103 | 3 |
| | 電力 | kW・h | 157 | 0.422 | 66 |
| 合計 | | | | | 252 |
| | | | | (天然水マグの場合 214) | |

2. 6 あとがき

本章では、天然水マグの存在に着目し、その長所を生かしつつ、欠点を技術的に補い、さらに赤リン添加によりその充填量を必要最低限にまで減らすことで、製造時における CO₂ 排出量を塩ビ電線対比 20 % 程度まで削減したエコ電線を実現した。今回得られた合成水マグ多量配合から天然水マグ少量配合へ替えるための配合技術は、第 1 章で述べた 2 層被覆構造化のための押出被覆技術とともに、エコ電線の製造指針にも取り入れられうるもので、エコ電線の品質向上と製造時 CO₂ 排出量の削減に寄与するものと考えらる。

参考文献

- 1) 益尾和彦：「エコ電線の新規難燃材料適用と今後の市場拡大の可能性について」、電気設備学会誌、Vol. 25、No. 11、pp. 850～853 (2005)
- 2) 会田二三夫、瀬田寧、川端秀雄ほか：「エコ材料の最先端」、(株)エヌ・ティー・エス、p. 47、pp. 52～53 (2004)
- 3) 沢田宏、森隆、小松善伸、小熊昭夫、小川政英：「水酸化マグネシウム系難燃剤及びその製法」、特許公報、特公平 7-42461 (公告日 1995. 5. 10)

- 4) 小林裕、益尾和彦：「難燃性ポリオレフィン樹脂組成物」、特許公報、特許第 3019840 号（登録日 2000. 1. 7）
- 5) 井上正人：「難燃性組成物及び電線ケーブル」、特許公報、特許第 3339154 号（登録日 2002. 8. 16）
- 6) 武田邦彦、西原一ほか：「ノンハロゲン系難燃材料による難燃化技術」、(株)エヌ・ティー・エス、pp. 26～27（2001）
- 7) Granzow. A.：「Applied Polymer Science」、Vol. 20、pp. 689～701（1976）
- 8) 沼幸子：「赤燐系難燃剤」、燐化学工業(株)第 4 回難燃剤セミナー資料（2004）
- 9) 世界保健機関 (WHO)：「Phosphine and Selected Metal Phosphides」、Environmental Health Criteria 73（1998）
- 10) 那波秀夫ほか：「赤リン有機剤含有合成樹脂燃焼時のホスフィン等の毒性」、消防研究所報告第 80 号（1995）
- 11) 山田正治：「電線の LCA 研究 (その 1)」、JECTEC NEWS、No. 38、pp. 8～9（2003）
- 12) 益尾和彦：「LCA を重視した電線ケーブルの環境配慮設計」、電気と工事、Vol. 47、No. 1、pp. 79～85（2006）

第3章 リサイクル塩化ビニル電線の残存寿命と再生技術

3. 1 まえがき

第1章、第2章で述べた通り、今後使用する電線については脱塩ビを進めるべく、脱塩ビ電線、即ちエコ電線の開発と改良を進めている。一方、既に使用された塩ビ電線については、廃棄するのではなく極力再使用すべく、電線へのリサイクル再使用が積極的に進められている。本章では、使用済み塩ビを再使用して製造した電線が、次の一生（ライフサイクル）の使用に耐えるかについて確認する。併せて、使用に耐えないものは再生技術の適用についても検討する。

まず、実験室レベルで、繰り返し押出加工実験により塩ビのリサイクル性を確認し、併せて加熱老化促進実験により塩ビの耐熱寿命をアレニウスの式に基づき推定・評価する。また、電力会社の使用済み塩ビ電線から採取した塩ビサンプルを用い、実際に電線を試作して、その残存寿命を推定・評価する。さらに、実際の現場では塩ビにポリエチレン（PE）が微量混入するケースが多いことから、その混入比率がどこまでなら再使用が可能か見極め、その上で、再使用が困難なものについては、ポリマーアロイ技術を適用して再生することを考え、試作・実験により再使用の可能性を確認する。最後に、使用済み農業用塩ビフィルムについて、その劣化調査の結果をもとに劣化の進行状況を解析し、その後、安定剤と可塑剤など追加補充することにより、電線用としての再生の可能性を試作・実験により確認する。

3. 2 塩化ビニルのリサイクル性と耐熱寿命の評価

使用済み塩ビ電線から採取した塩ビ材料を再使用して電線を製造する場合、塩ビ材料は、2回のライフサイクルに耐えなければならない。その間、材料は、コンパウンド混合→ペレット状化（押出1回）→電線被覆（押出1～2回）→電線通電使用（30年間、熱・酸素・光を受ける）→撤去解体粉碎→ペレット状化（押出1回）→電線被覆（押出1～2回）→電線通電使用（30年間、熱・酸素・光を受ける）の履歴を受けることになる。その間に材料の受けるダメージとしては、押出加工時におけるシリンダー内スクリュウの回転による機械的ダメージと、電線通電使用時における熱的ダメージの2つが主となる。この2つのダメージを実験室レベルで等価模擬するため、前者については繰り返し5回押出加工実験を、後者については加熱老化促進実験を行った。

3. 2. 1 押出加工実験

供試サンプルとして、JIS K 6723「一般絶縁用塩ビコンパウンド」に規定のバージンの PVC コンパウンド（PVC/可塑剤 DOP/鉛系安定剤/充填剤＝100/50/5/30）と、比較のためにリサイクル性に優れた材料であるエコマテリアル、即ち耐燃ポリエチレンコンパウンド（直鎖状低密度ポリエチレン LLDPE / 難燃剤 $Mg(OH)_2$ / 加工助剤＝100/140/2）を用意した。（括弧内の数字は配合部数を示す。）

実験は、まず、コンパウンドサンプルを用いてケーブルコア（下径 16 mm）上に厚さ 1.5 mm に押出被覆（押出条件：設定温度 160℃、スクリー回転数 50rpm）した。次に、被覆した材料の一部をサンプリングし、その材料特性を測定した後、被覆材料を全て皮剥ぎ除去し、再度の押出被覆用に用いた。以上を 1 サイクルとし、同じことを合計 5 サイクル行った。この実験の目的は、スクリー回転による剪断応力により分子鎖の切断現象が起こっているかを、材料の特性変化により検出するもので、常温での引っ張り特性（破断強度、破断伸び）のほか、耐熱特性、耐油特性について測定した。測定は JIS C 3005「ゴム・プラスチック絶縁電線試験方法」に規定の「絶縁体及びシースの引っ張り」、「加熱」、「耐油」の各試験方法に基づき行い、サンプル数は各サイクル、各特性それぞれ 3 とした。

測定の結果は表 1. 3. 1 に示す通りで、塩ビ (PVC) と耐燃ポリエチレン (PE) とともに、特性値の低下は殆どなかった。これより、押出加工時に受ける剪断力による分子鎖切断の程度は、材料の特性低下を起こす程顕著でないことがわかった。

表 1. 3. 1 繰り返し 5 回押出加工による材料特性の変化

| | | PVC | | | | | 耐燃PE | | | | |
|------------|----------|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | | 1回 | 2回 | 3回 | 4回 | 5回 | 1回 | 2回 | 3回 | 4回 | 5回 |
| 破断強度 (MPa) | | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| 破断伸び (%) | | 310 | 305 | 310 | 310 | 300 | 580 | 570 | 560 | 580 | 580 |
| 耐熱 | 強度残率 (%) | 97 | 98 | 95 | 96 | 95 | 100 | 110 | 95 | 100 | 100 |
| | 伸び残率 (%) | 102 | 100 | 102 | 98 | 105 | 95 | 100 | 94 | 95 | 90 |
| 耐油 | 強度残率 (%) | 89 | 80 | 87 | 85 | 90 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| | 伸び残率 (%) | 86 | 82 | 84 | 85 | 88 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 |
| 試験条件 | | 耐熱: 100℃×48hrs 耐油: 70℃×4hrs | | | | | 耐熱: 90℃×96hrs 耐油: 70℃×4hrs | | | | |

3. 2. 2 加熱老化促進実験

加熱老化促進実験を行うにあたり、PVC 材料の劣化の化学反応について、以下に簡単に述べる。一般に高分子材料の劣化反応速度は、次のアレニウス (Arrhenius) の式で表される¹⁾。

$$k = A e^{-E/RT} \dots\dots\dots (1.3.1)$$

k : 反応速度定数、A : 頻度因子、E : 活性化エネルギー (J/mol)、
R : 気体定数 (J/(mol · K))、T : 絶対温度 (K)

式 (1.3.1) で、両辺の自然対数をとると次式となる。

$$\ln k = \ln A - E/RT \dots\dots\dots (1.3.2)$$

ここで、ある一定の反応速度 k で劣化が進み、寿命 L に達すると考えると、寿命 L は k の逆数に比例するので、式 (1.3.2) は、次式の通り変形できる。

$$1/T = B \log_{10} L + C \dots\dots\dots (1.3.3)$$

T : 絶対温度 (K)、B : 定数、L : 寿命 (hrs)、C : 定数

これより、縦軸に 1/T、横軸に $\log_{10} L$ をとると、式 (1.3.3) は傾き B の直線となる。従って、当該の高分子材料の実使用温度に比べ、それより高い最低 2 点、できれば 3 点以上の高温にて加熱老化促進試験を行い、各温度で得られた寿命値をグラフ上にプロットしそれを直線で結べば、実使用温度領域における寿命値が推定できる。また、直線の傾き B は活性化エネルギー E の逆数、即ち反応の起こりやすさを示し、傾きが大きい程反応は起こりやすく、小さい程起こりにくいことになる。

まず、供試サンプルとして前述の 5 回繰り返し押出加工後のバージン PVC コンパウンドを用い、加熱老化促進試験を行った。試験は、JIS K 6723 規定の「加熱後引張試験方法」に基づいて行い、加熱温度は 110℃、120℃、130℃、140℃ の 4 点とした。寿命の定義は、「伸び 100% の時点」と「伸び 50% の時点」とし、サンプル数は各加熱温度、各加熱時間それぞれ 3 とした。試験の結果得られた各加熱温度における寿命値は、「伸び 100%」の場合、53hrs (140℃)、165hrs (130℃)、255hrs (120℃)、640hrs (110℃) となり、「伸び 50%」の場合、80hrs (140℃)、200hrs (130℃)、390hrs (120℃)、1,000hrs (110℃) となった。これらをグラフ上にプロットし、それを直線で結んだものを 図 1.3.1 に示す。

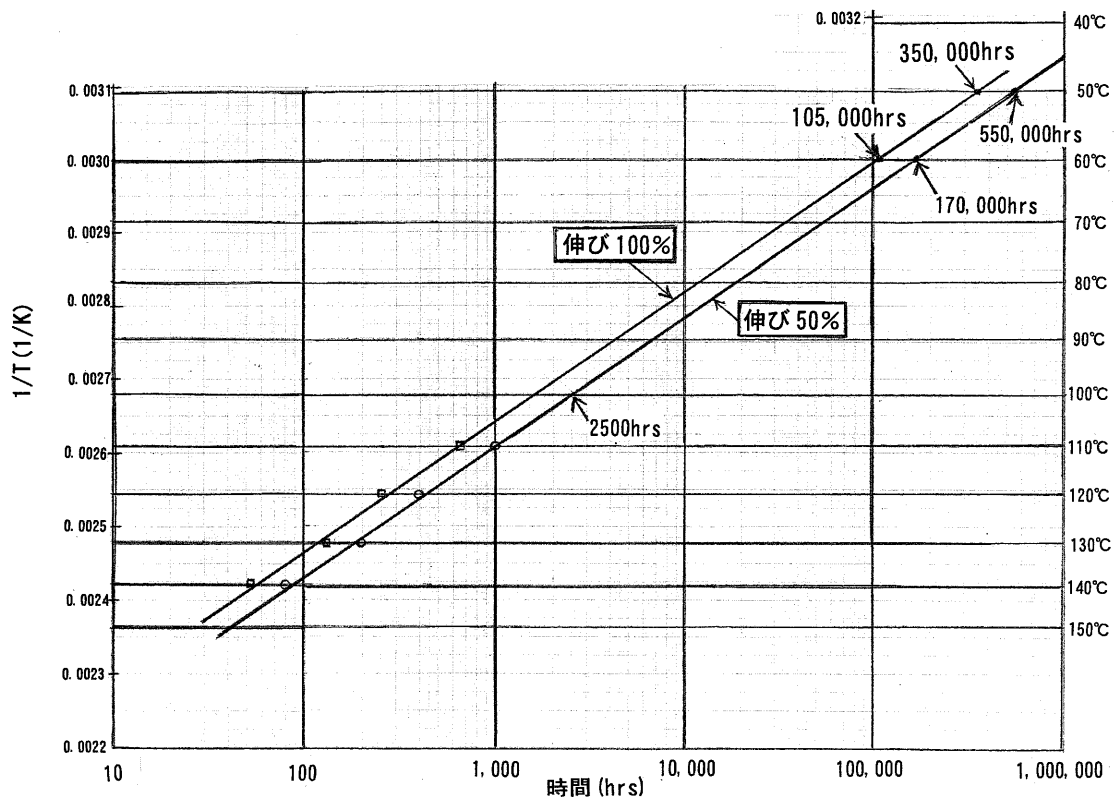


図 1.3.1 バージン PVC の温度と寿命の関係

図より、各実使用温度における寿命値は、「伸び 100%」の場合、105,000hrs (60℃) と 350,000hrs (50℃) になり、「伸び 50%」の場合、170,000hrs (60℃) と 550,000hrs (50℃) になった。ここで、塩ビ (PVC) 電線の耐熱寿命は、電気用品の技術基準により、「60℃×40,000 hrs (伸び 100%の時点をも寿命と定義)」と規定されている。従って、 $105,000/40,000=2.6$ より、2 回のライフサイクルに十分耐えることが確認できた。なお、「伸び 50%」の場合を例にとると、直線は 2,500hrs (100℃) と 170,000hrs (60℃) の 2 点を通ることから、その傾きは、 $(0.00300-0.00268) / (5.230-3.398) = 0.000175$ となった。

3. 3 リサイクル 0W 電線の残存寿命の評価

3. 3. 1 廃電線から採取した塩化ビニルの 0W 電線への再利用

纏まった量で回収のできる電力会社管内の撤去配電線に着目し、その塩ビ (PVC) 被覆片を 0W 電線 (低圧用 PVC 絶縁架空配電線) に再利用するための検討を関西電力(株)と共同で実施した。関西電力(株)管内における配電線の撤去電線のう

ち、PVC 絶縁電線の撤去量は年間約 9,000 km で全撤去電線の約 50%を占め、その PVC 被覆屑量は年間約 560 トンに及んでいる。この 560 トンの PVC 被覆屑の処理の実態を 図 1.3.2 に示す。

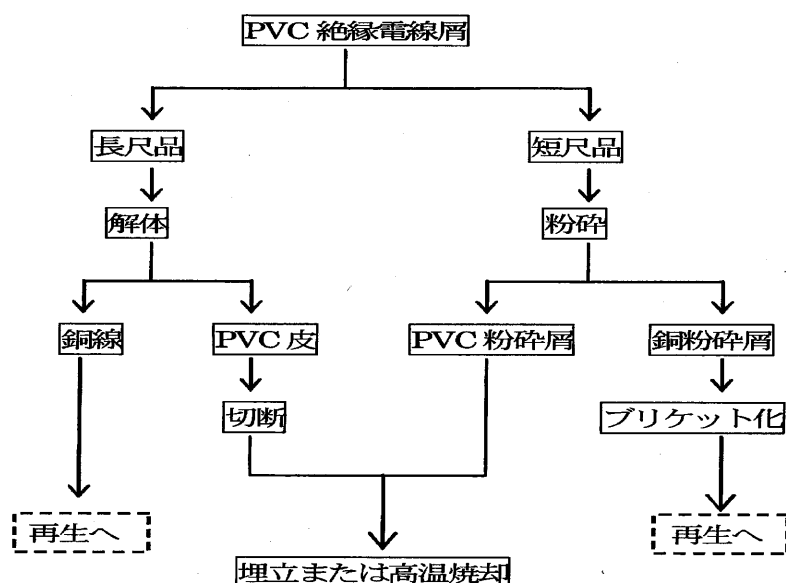


図 1.3.2 PVC 絶縁電線屑の処理のフロー 2)

図に示す通り、撤去電線が長尺の場合は解体方式で、短尺の場合は粉碎方式で処理され、その PVC 屑採取量はそれぞれ 215 トン (4 割) と 345 トン (6 割) である。解体方式の場合、被覆皮剥ぎ作業により銅と PVC 皮に別けられる。一方、粉碎方式の場合、電線は丸ごと粉碎され、その後簡易選別機で銅と PVC 粉碎屑に別けられる。これをナゲット処理と言う。当然ながら、解体方式で採取される PVC 皮の方が、銅粉、ポリエチレン粉、その他異物の混入が少なくリサイクルし易いと考えられるので、この解体方式による PVC 皮を対象を絞りリサイクル加工の検討を進める。

3.3.2 解体 PVC 皮の加工と電線試作

皮剥採取された PVC 皮を電線押出機に投入できる状態にするために、製造上、性能上問題なく、かつコストの最も安い加工方法を探す必要から、次の 3 つの試作を行った。

- (試作 A) PVC 皮を粉砕機で粉砕した後、そのまま電線押機に投入。
- (試作 B) PVC 皮を粉砕機で粉砕した後、水による洗浄、脱水、乾燥を行ってからそのまま電線押出機に投入。
- (試作 C) PVC 皮を粉砕機で粉砕した後、一旦小型押出機にてメッシュを介し溶融押出後、粒状ペレット状化した上で電線押出機に投入。

以上の 3 種類の PVC サンプルを用いて 0W 電線 38mm² を試作した。試作にあたっては製造上の問題点の確認を行い、試作後の電線サンプルを用いて性能確認試験を行った。結果を 表 1.3.2 に示す。

表 1.3.2 リサイクル 0W 電線 (38mm²) の試作/性能評価²⁾

| | | | 試作 A | 試作 B | 試作 C |
|------------|--------------------------------|----------|------------------------|----------------|---------------------------|
| 材料製造 | PVC採取方法 | | 皮剥ぎ | 皮剥ぎ | 皮剥ぎ |
| | 採取後の処理 (不純物除去) | | 粉碎のみ | 粉碎後、水洗 浄、乾燥 | 粉碎後、小型 押出機にてペ レット状化 |
| OW電線 製造 | 製造可否 | | 可能 | 可能 | 可能 |
| | 問題点 | | メッシュに 銅片が目詰 まりする | 問題なし | 問題なし |
| OW電線 特性 | 絶縁抵抗 (MΩ・km, 20℃) | | 66 | 68 | 65 |
| | 交流破壊電圧 (kV) | | 39 | 36 | 36 |
| | 破断強度 (MPa) | | 18.8 | 18.8 | 18.9 |
| | 破断伸び (%) | | 297 | 309 | 317 |
| | 耐熱 (100℃, 48H) | 強度残率 (%) | 92 | 93 | 92 |
| | | 伸び残率 (%) | 86 | 87 | 87 |
| | 加熱変形率 (%) (120℃, 30分, 荷重5N) | | 8.3 | 9.1 | 8.6 |
| | 低温巻付 (-10℃) | | ヒビ割れなし | ヒビ割れなし | ヒビ割れなし |
| | 巻付加熱 (120℃) | | ヒビ割れなし | ヒビ割れなし | ヒビ割れなし |
| 製造コスト | | | 安い ←————→ 高い | | |

表に示す通り、製造面では、試作 A には問題があったが、試作 B、C では問題がなかった。性能面では、いずれの試作品もバージン品に比較するとやや特性は低下しているものの、0W 電線の JIS 規格³⁾ は十分に満たしており実使用可能レベルであることがわかった。コスト面では、試作 A が最も安く、試作 B はやや高くなるが許容の範囲、試作 C は溶融押出するためかなり高くなる。以上を勘案すると試作 B が現実解ということになる。

3. 3. 3 リサイクル 0W 電線の残存寿命

リサイクル品の寿命はバージン品に比べ劣る可能性が高く、その使用にあたり残存寿命の確認が必要となる。本項では、上記(試作 B)のリサイクル電線を対象に加熱老化促進試験を行う。即ち、関西電力(株)管内で架空配電線として 35～40 年間使用済みの 0W 電線 38mm^2 を撤去し、被覆皮剥ぎにより PVC 皮を採取し、粉碎機で粉碎した後、水による洗浄、脱水、乾燥を行ってから電線押出機に投入して、再度同サイズの 0W 電線を試作し、その被覆の一部をサンプリングして加熱老化促進試験を 100°C 、 110°C 、 120°C 、 130°C 、 140°C の 5 点の加熱温度で行った。各加熱温度、各加熱時間のサンプル数は 3 とした。結果を 図 1. 3. 3 に示す。

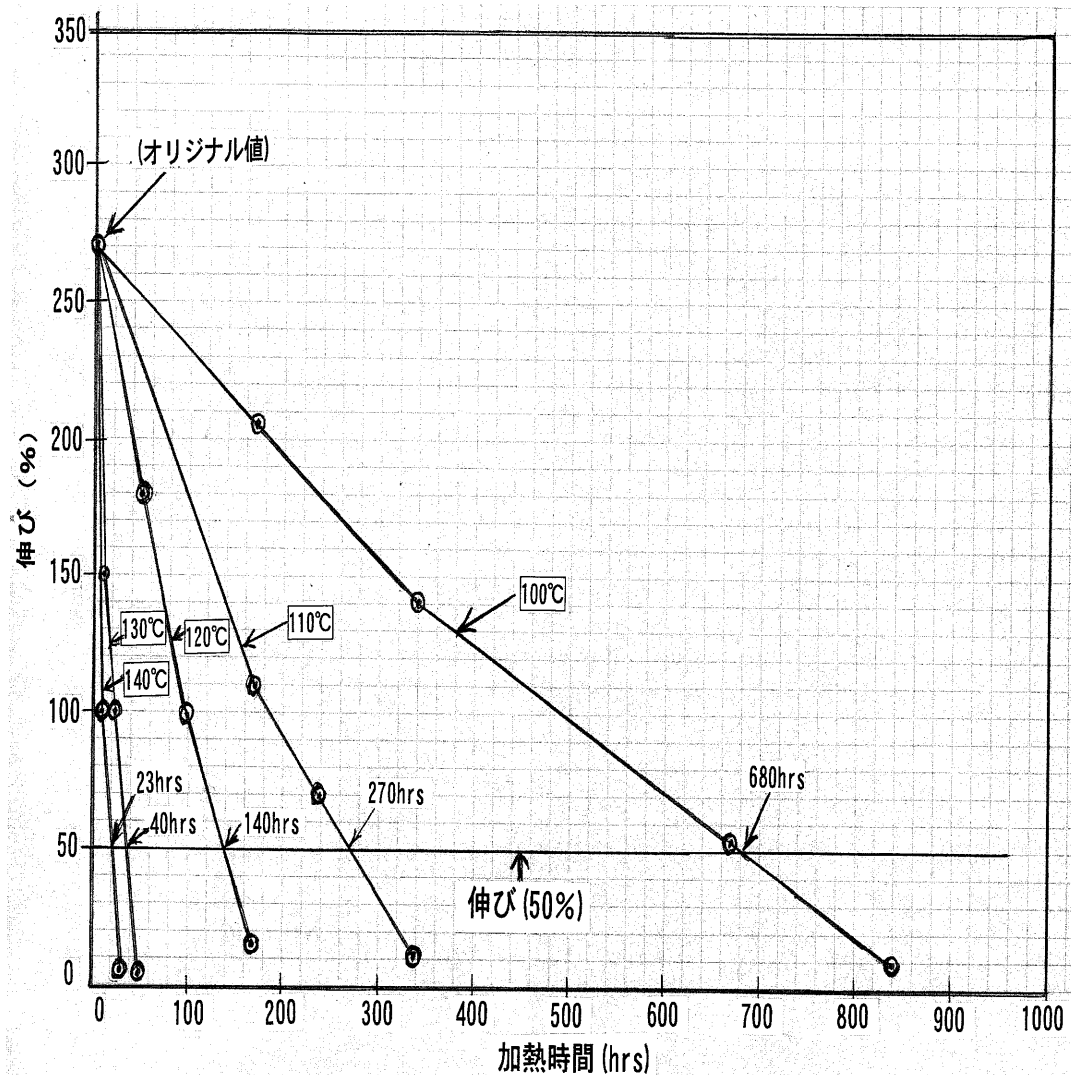


図 1. 3. 3 伸びと加熱時間の関係

図 1.3.3 は、各加熱温度における時間(hrs)と伸び(%)の関係を示したもので、寿命の定義を「伸び 50% の時点」とすると、それぞれの温度における寿命は、23hrs (140℃)、40hrs (130℃)、140hrs (120℃)、270hrs (110℃)、680hrs (100℃)となる。

電線を自己径の 1 倍、2 倍、3 倍の径に巻き付けた時、電線表面が受ける伸びは、それぞれ 50%、33%、25% となる。現実では、固定配線の電線は自己径の 3 倍以下に巻き付けられることはなく、電線材料の伸び特性が 50% 以上であれば亀裂・割れを起こすことがないと考えられる。従って、ここでは実使用上の寿命の定義を「伸び 100% の時点」でなく「伸び 50% の時点」とするのが妥当と考えた。

上記の通り得られた各加熱温度における寿命値 5 点をグラフ上にプロットし、それを直線で結ぶと 図 1.3.4 のようになる。

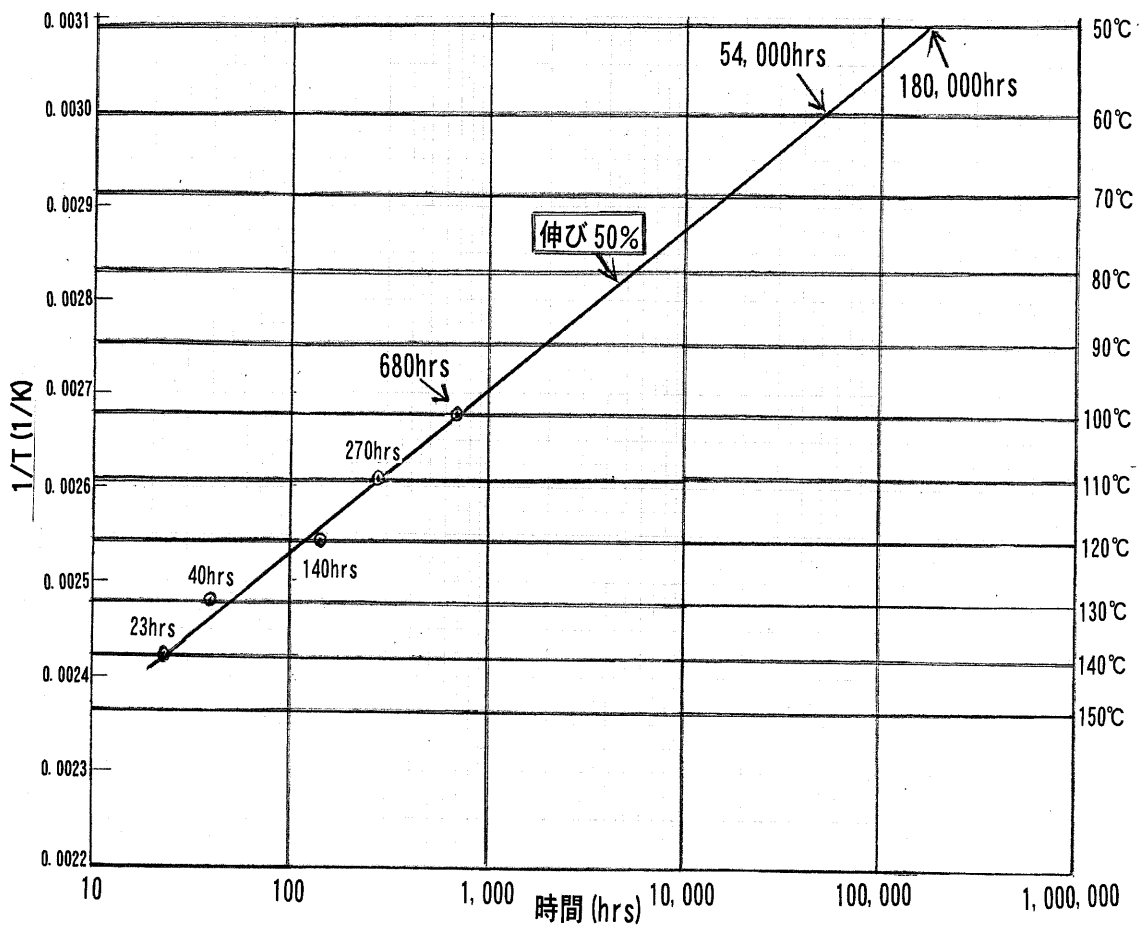


図 1.3.4 リサイクル 0W 電線の温度と寿命の関係

図より、リサイクル 0W 電線の寿命は、PVC の使用上限温度の 60℃ (周囲温度 30℃) の場合、54,000hrs (6.2 年) となるが、実際の布設環境は、日本においての四季の平均周囲温度は 20℃ であり、上記の 30℃ より 10℃ 低いと考えてよい。従って 0W 電線の導体に接する PVC 絶縁体内面は 10℃ 低い 50℃ で考えてよく、その場合の推定寿命は 180,000hrs (20.5 年) となり、20 年を超えることより、リサイクル 0W 電線は、もう 1 回のライフサイクルの使用に耐えるレベルにあると考えられる。なお、直線は 680hrs (100℃) と 54,000hrs (60℃) の 2 点を通ることから、その傾きは $(0.00300 - 0.00268) / (4.732 - 2.833) = 0.000169$ となった。

3. 4 ポリエチレン混入塩化ビニルとポリマーアロイ技術の適用

撤去品を品種毎に仕分けする作業は人手によるため、塩ビ電線として回収されてくるものの中にはポリエチレン電線が誤って混入されていることが多い。その混入量は、調査の結果 3 % 程度であることがわかった。従って、リサイクル再使用する場合には、撤去電線入荷ロット毎の混入バラツキも考慮して最大 5 % 程度の混入を見込んでおく必要がある。

撤去電線解体により採取した塩ビ (PVC) とポリエチレン (PE) を各種の比率で混合したものをを用いて、0W 電線 5.0 mm を製作し、その特性を評価した。結果を図 1.3.5、図 1.3.6 に示す。図より、破断強度特性、破断伸び特性、及び耐熱特性 (強度残率、伸び残率) とともにポリエチレン混入による影響を受けやすく、10% 程度の低い混入率でも実使用できないレベルにまで低下することがわかった。一方で、混入率が 5 % を超えなければ規格値 (0W 電線の JIS 規格³⁾) を満たすことがわかった。

次に、ポリエチレン混入比率が 10 % でも特性を満たす方策としてポリマーアロイ技術の適用につき基礎的検討を行った。一般に、PVC のような高極性の材料と PE のような低極性の材料は、熔融混合しても分離して混ざらず機械的物性が著しく低下する。この水と油のように混じり合わない材料同士を接着させるという観点から、高極性部分と低極性部分を合わせもつ相溶化剤が、それぞれ高極性ポリマー (この場合は PVC) と低極性ポリマー (この場合は PE) とに親和性を示し、両者を接着させる機能をもつと考えた。この相溶化剤は、ポリマーアロイ型のホットメルト接着剤で、PVC に接着性を示す高極性のポリアミド系ホットメルト接着剤と PE に接着性を示す低極性の EEA (エチレンエチルアクリレート共重合体) 系ホットメルト接着剤とを縮合体化したものである。図 1.3.7 に模式的に示す通り、高極性部分 (PVC に親和性を示す) と低極性部分 (PE に親和性を

示す) の縮合体である相溶化剤には、PVC ポリマーと PE ポリマーをアロイ化させる機能がある。

相溶化剤の効果を確認するため、まず、バージンの PVC と PE を用いて基本特性の確認試験を行った。試験は、(PVC/PE) の比率が、(90/10) と (70/30) の 2 つの場合で、それぞれ、単純ブレンド (相溶化剤ゼロ) と アロイ化 (相溶化剤 20 部、10 部、5 部添加) のシートサンプルを用いて行った。試験の結果は 図 1.3.8 に示す通りで、(PVC/PE) = (90/10) の場合は相溶化剤を 10 部添加すれば、引っ張り特性 (破断伸び、破断強度)、耐熱特性、耐油特性の規格値を全て満足することが確認できた。また、(PVC/PE) = (70/30) の場合は相溶化剤 20 部添加しても、耐熱、耐油の 2 特性を満足しないことがわかった。次に、使用済み後回収した PVC と PE を用い初期特性の確認試験を行った。試験は、(回収 PVC/回収 PE) = (90/10) の比率のものに、相溶化剤を 10 部添加したシートサンプルを用いて行った。試験の結果は 図 1.3.9 に示す通りで、ポリエチレン混入比率が 10 % の場合、単純ブレンドではその特性は規格値に遥かに及ばないが、相溶化剤を 10 部添加すれば規格値を満たすレベルになることが確認できた。

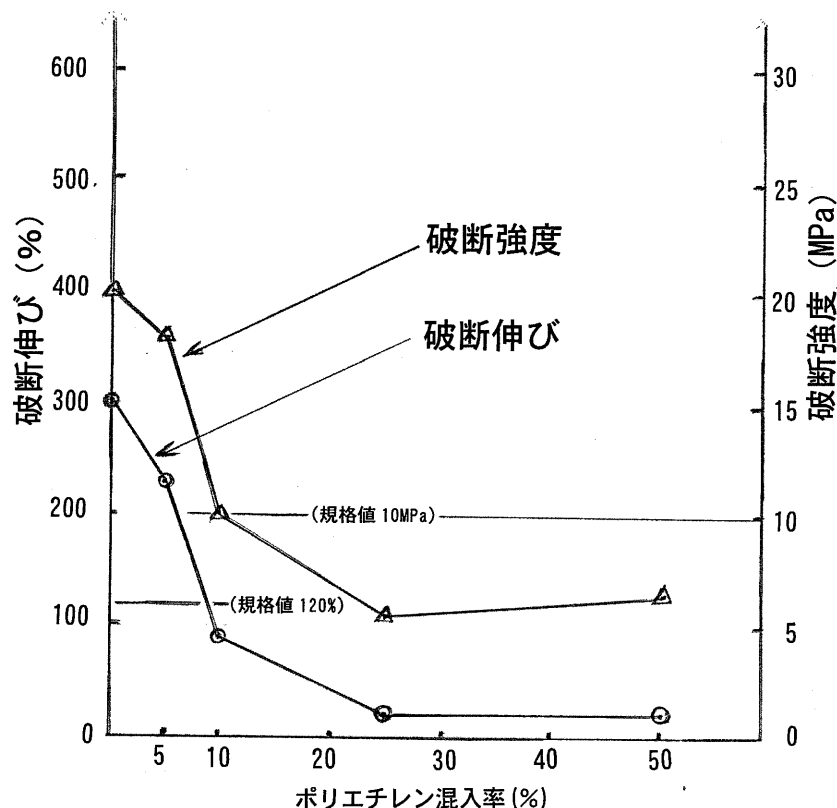


図 1.3.5 PVC/PE 混合品の破断強度と破断伸び

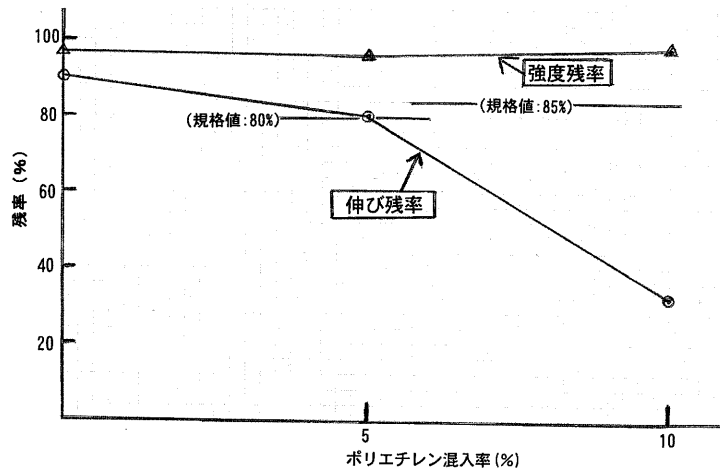


図 1. 3. 6 PVC/PE 混合品の耐熱特性 (100℃×48 H)

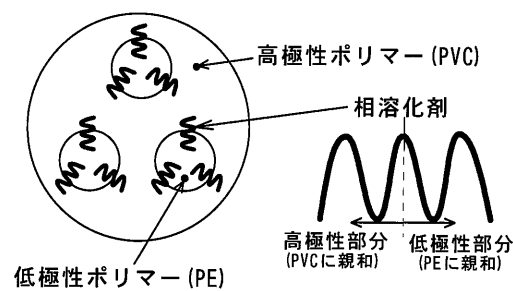


図 1. 3. 7 高極性ポリマーと低極性ポリマーのアロイ化の原理 ⁴⁾

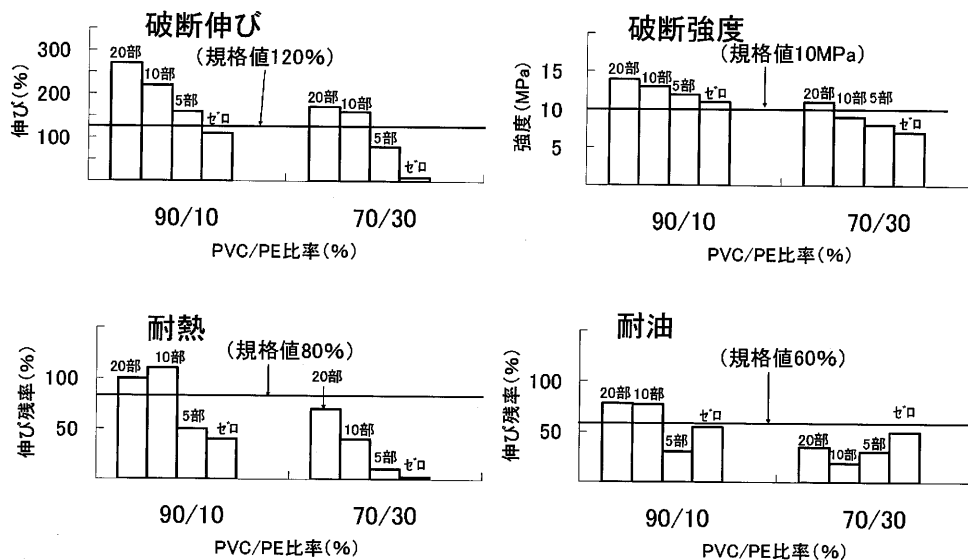


図 1. 3. 8 (バージン PVC/バージン PE) のアロイ化後の特性

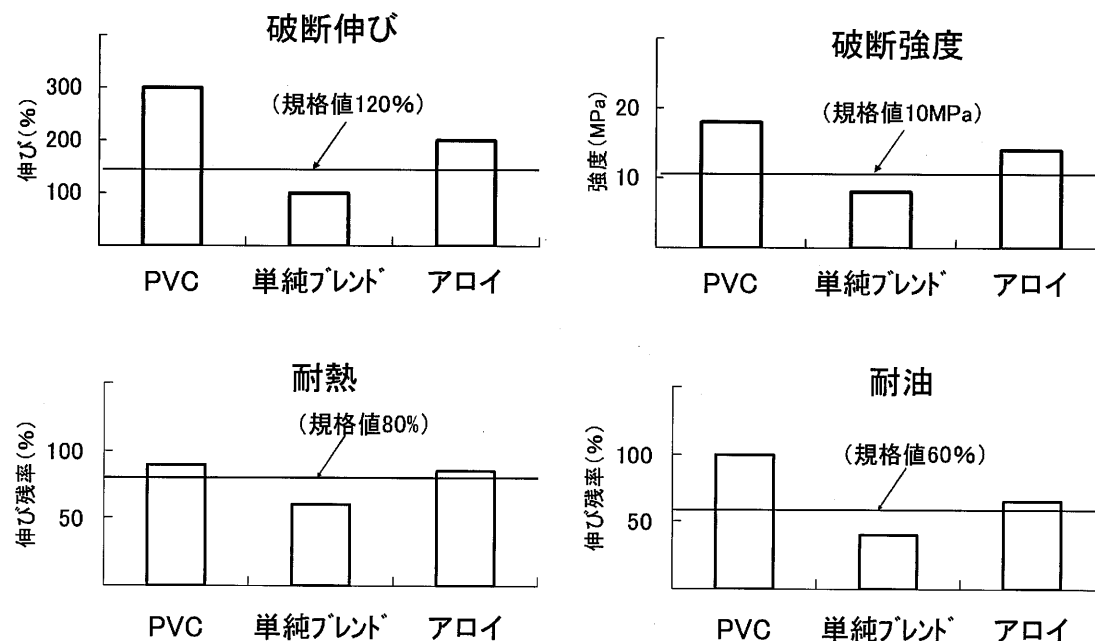


図 1. 3. 9 (回収 PVC/回収 PE=90/10) のアロイ化後の特性

3. 5 回収農業用塩化ビニルフィルムの劣化調査及び再生配合の検討

3. 5. 1 回収農業用塩化ビニルフィルムの劣化調査

使用済みの回収農業用塩ビフィルム（以下、回収農ビと言う）は、使用期間が1～3年のため劣化の進行は軽微であると同時に、農ビには透明度が要求されるため、安定剤に黒色の鉛系でなく透明の非鉛系のものが使用されている。これは有害な鉛系物質による農作物への悪影響を避けるためでもある。このように、回収農ビは、残存寿命が長くかつ無害な安定剤を使用しているために、リサイクル塩ビ電線への適用には極めて好都合と言える。

この回収農ビを電線へ再利用する検討を進めてきたが²⁾、それを実施に移すにあたり、回収農ビが電線用として特性を十分満たすまでに再生可能かを確認するための検討を行う。

回収農ビとバージン農ビの両サンプルを用い、JIS K 6723 に規定の試験項目に基づき、特性比較試験を行った。（試験は、大洋電工(株)と(社)電線総合技術センター(JECTEC)の協力のもとに行った。）結果を 表 1. 3. 3 に示す。

表 1.3.3 回収農ビとバージン農ビの特性比較

| | | 回収農ビ | バージン農ビ |
|---------------------|-----------|--|---|
| 比重 | | 1.25 | 1.23 |
| 引っ張り特性 | 100%モジュラス | 9.7MPa | 8.8MPa |
| | 破断強度 | 17.2MPa | 18.9MPa |
| | 破断伸び | 313% | 397% |
| 耐熱性 (100℃×120時間) | 強度残率 | 108% | 101% |
| | 伸び残率 | 93% | 90% |
| 耐油性 (70℃×4時間) | 強度残率 | 105% | 93% |
| | 伸び残率 | 101% | 89% |
| 加熱変形率 | | 10.2% | 10.5% |
| 耐寒性 | | 破壊せず | 破壊せず |
| 熱安定性(180℃) | | 0.3hrs | 2.8hrs |
| 体積固有抵抗率(30℃) | | $6.85 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ | $3.5 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ |
| 硬度 | | 30 | 27 |
| 脆化温度 | | -22.2℃ | -24.6℃ |
| 粘度法(JIS K 7367) | | 粘度の低下:3~4% | (基準値) |
| XPS分析 | | C ₂ /C比率の低下:1~2% O/C比率の上昇:ゼロ | (基準値) |

表 1.3.3 の結果に基づき、回収農ビの劣化の進展状況について考察する。一般に、PVC の劣化には、①脱塩酸による劣化、②可塑剤の揮散による劣化、③自動酸化反応による劣化 の 3 つが知られている^{5), 6)}。以下では、3 つの劣化に基づき順に解析する。

①脱塩酸による劣化

藤井、垣内⁵⁾ は、PVC 特有の劣化である「脱塩酸による劣化」のメカニズムを以下のように説明している。つまり、熱や光により最初にどこかで塩酸 HCl が 1 つ放出され、それによりその隣に二重結合が 1 つでき、さらにその隣の H や Cl が取れやすくなり、再び塩酸 HCl が放出され、それによりその隣に再び二重結合ができるというように、連鎖反応が起こる。このように二重結合が連続して生じると、材料は外観上黄色に変色し、その連続が長いほど色は濃くなる。一般に PVC には安定剤が添加されており、安定剤から生じる塩酸 HCl が直ちに二重結合と反応するため、二重結合の連鎖的な発生を停止させる。

表 1.3.3 の通り、180℃での HCl ガス発生を試験紙の変色で検出する熱安定性試験の結果、回収農ビは変色迄の時間が 0.3 hrs と極めて短いことから、有効な安定剤は殆ど残っていないことがわかった。また、劣化による分子構造変

化を見るための XPS (X 線光電子分光分析) の結果、回収農ビは基準値 (バージン農ビ) 対比 1~2% の Cl/C 比率の低下が見られることより、脱塩酸による劣化が進んでいることがわかった。

②可塑剤の揮散による劣化

藤井、垣内⁵⁾ は、軟質 PVC 特有の劣化である「可塑剤の揮散による劣化」について、可塑剤はその親和性に基づいて鎖状高分子の間隙に入り込み、分子相互間の動きを容易にするもので、その効果は可塑性の増大のほか、強度の低減、伸びの増大であるとしている。可塑剤は熱により揮散し、材料の機械特性を低下させる。

表 1.3.3 の通り、引っ張り特性、加熱老化、耐油性、加熱変形率、耐寒性、体積固有抵抗率については、回収農ビはバージン品に比べ若干の変化があるが、規格は十分満たすレベルであることより、可塑剤の揮散は軽微であることがわかった。

③自動酸化反応による劣化

本間⁶⁾ は、全ての高分子材料において、熱劣化は「自動酸化反応」によって以下の通り進むと論じている。まず、熱と酸素の存在下で、酸素による水素の引き抜き反応により炭化水素ラジカル ($R\cdot$) が生成する。これを「連鎖開始」と言う。次に $R\cdot$ は酸素と反応し、パーオキシラジカル ($ROO\cdot$) を生成する。この $ROO\cdot$ は他の炭化水素から水素を引き抜き、ヒドロパーオキシド ($ROOH$) を生成する。また、 $ROOH$ は高温下で分解して $ROO\cdot$ やオキシラジカル ($RO\cdot$) を生成し、さらに $ROO\cdot$ や $R\cdot$ の発生を誘発する。この段階で $RO\cdot$ 自身の分解によって分子切断が起こることになる。これを「連鎖成長」と言う。そして最後にはラジカル同士が反応して分解は停止するが、この段階で架橋反応も起こる。これを「連鎖停止」と言う。上記の分子切断や架橋反応は、材料の脆化や、材料表面の微細クラック発生を引き起こす。

表 1.3.3 の通り、100%モジュラスと硬度のデータより、回収農ビはバージン農ビと比較し若干硬くなっており、かつ脆化温度のデータより若干の脆化が認められる。しかし、いずれも軽微であることより、酸化劣化の程度は軽微であると判断される。また、粘度から平均分子量を求める粘度法の結果より、回収農ビは基準値 (バージン塩ビ) 対比 3~4% 程度の粘度低下であり、さらに XPS 分析の結果より、O/C 比率の上昇は殆ど認められないことから、酸化劣化は殆どないと考えてよいことがわかった。

以上纏めると、塩ビの劣化は、第 1 に脱塩酸→第 2 に可塑剤揮散→第 3 に自

動酸化反応の順に進み、回収農ビの場合は、第 2 の可塑剤揮散の段階にあり、第 3 の自動酸化反応による分子切断は始まっていない。ここで、分子切断が始まっていないことは重要で、後述のリサイクル再生が可能であることを意味する。

3. 5. 2 再生配合の検討

上記の回収農ビを電線用に再使用するため、その再生配合について検討する。

(1) 再生配合とその特性

脱塩酸による劣化に対しては、安定剤の補充を考えた。前述の通り、農ビには透明性が求められるため、安定剤に透明の非鉛系化合物（例えば、亜鉛化合物）を用いており、同じ非鉛系化合物を必要量全部（5 部）補充することにした。また、充填剤の炭酸カルシウム CaCO_3 は、破断強度を 17.2MPa から 20 MPa 以上（規格値）に向上するための必要量（20 部）を充填することにした。さらに充填剤の充填に伴う破断伸びの低下（313→230 %）を補うため、可塑剤 DOP を 5 部補充することで、破断伸びを 280 % にまで向上させた。（表 1. 3. 4 参照）

再生配合サンプルを用い、ケーブルコア（下径 16 mm）上に押出被覆（厚さ 1.5 mm）した後、その被覆の一部をサンプリングし、JIS C 3005 に規定のケーブルの PVC シースに要求される特性につき測定した。結果は、表 1. 3. 4 の下段に示す通り、規格値を全て満たすことを確認した。

表 1. 3. 4 再生配合とその材料特性

| | 回収 PVC | 可塑剤 DOP | 非鉛系 安定剤 | 充填剤 CaCO_3 | 合計 |
|----|-----------|------------|------------|------------------------|-----|
| 部数 | 100 | 5 | 5 | 20 | 130 |

| | | 材料特性値 | (規格値) |
|---------------------|------|-------|-----------|
| 破断強度 | | 21MPa | (10MPa以上) |
| 破断伸び | | 280% | (100%以上) |
| 耐熱 (100°C×48hrs) | 強度残率 | 95% | (85%以上) |
| | 伸び残率 | 93% | (80%以上) |
| 耐油 (70°C×4hr) | 強度残率 | 86% | (80%以上) |
| | 伸び残率 | 80% | (60%以上) |

(2) 加熱老化促進試験による残存寿命の推定

再生配合サンプルを用い、加熱老化促進試験によりその残存寿命を求めた。加熱温度は 120℃、130℃、140℃、150℃とし、寿命の定義は「伸び 50%の時点」とした。結果は 図 1.3.10 に示す通りで、再生配合材料の寿命は、PVC の使用上限温度の 60℃の場合、130,000hrs (14.8 年) となった。これは、前述のリサイクル 0W 電線の 54,000hrs (6.2 年) より長いものとなった。その理由は、安定剤や可塑剤を補充したこと他に、農ビの場合は、使用期間が 1~3 年と短く、かつ 0W 電線のように通電による温度上昇もないため、劣化の進行が軽微であったためと考えられる。また、図 1.3.10 の直線は、1,900hrs (100℃) と 130,000hrs (60℃) の 2 点を通ることから、その傾きは $(0.00300 - 0.00268) / (5.114 - 3.279) = 0.000174$ となった。

直線の傾きは、劣化反応の活性化エネルギーの逆数、即ち反応の起こりやすさを表し、この回収農ビの再生配合（以下、「農ビリサイクル PVC」と言う）の傾き (0.000174) が、前述のバージン PVC (傾き 0.000175) や、リサイクル 0W 電線 (傾き 0.000169) とほぼ同じであることより、3 者ともに、その劣化は、第 1 に脱塩酸→第 2 に可塑剤揮散→第 3 に自動酸化反応の順で進んでおり、第 2 の可塑剤揮散の段階にあるという知見を得ることができた。

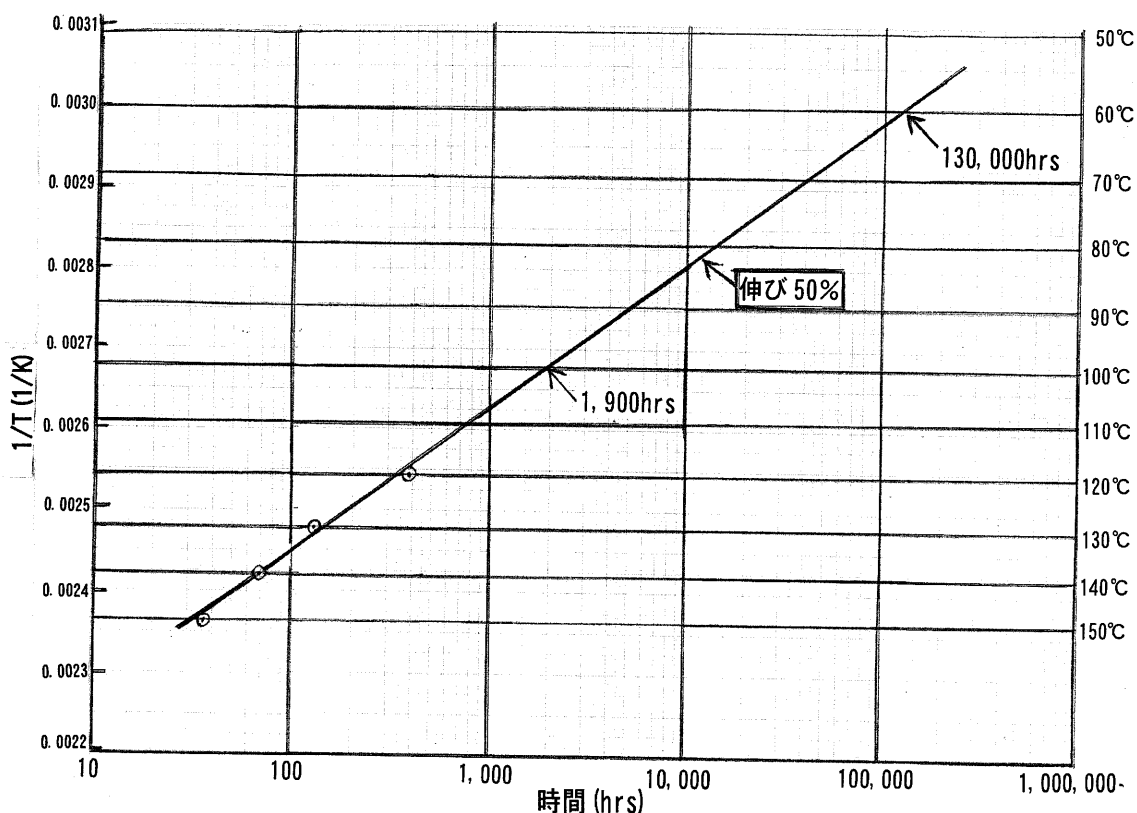


図 1.3.10 再生配合 (農ビリサイクル PVC) の温度と寿命の関係

3. 6 リサイクル塩ビ電線の LCA 分析

第2章の表1.2.4で示した通り、代表的サイズの電線(制御用 $3 \times 2 \text{ mm}^2$)を対象として、ライフサイクルアセスメント(LCA)分析により、塩ビ電線(CVV)とエコ電線(EM-CEE)それぞれの製造時 CO_2 排出量を試算しており、その表を以下の説明のため表1.3.5に再度掲げた。

リサイクル塩ビ電線(リサイクル CVV)の場合については、リサイクルした塩ビを使用することから、表中○印を付けたビニルと DOP 可塑剤の製造時 CO_2 排出量分がそのまま除外できるので、理論計算上、 $271 - 82 - 44 = 145 (\text{CO}_2\text{-kg})$ となる。これより、電線 1 km あたりの製造時 CO_2 排出量は、CVV が $271 \text{ CO}_2\text{-kg}$ であるのに対し、EM-CEE は $252 \text{ CO}_2\text{-kg}$ (CVV に対し 7% の削減)、または、 $214 \text{ CO}_2\text{-kg}$ (CVV に対し 21% の削減)であるが、リサイクル CVV は、 $145 \text{ CO}_2\text{-kg}$ となり、CVV に対し 46% の大幅削減になることがわかった。

表1.3.5 リサイクル塩ビ電線の製造時 CO_2 排出量

| | 投入素材 | | 投入量 | CO ₂ 排出量 CO ₂ -kg | |
|--------------------------------|-------------|------|---------|---|---------|
| | 素材名 | 単位 | 1km製造当り | 単用量当り | 1km製造当り |
| CVV 3 × 2mm ² | 銅 | kg | 54 | 1.248 | 67 |
| | ビニル | kg | 48 | 1.711 | 82 |
| | DOP可塑剤 | kg | 24 | 1.826 | 44 |
| | ポリプロピレン：介在 | kg | 9 | 0.964 | 9 |
| | 木製ドラム | kg | 25 | 0.103 | 3 |
| | 電力 | kW・h | 157 | 0.422 | 66 |
| | 合計 | | | | 271 |
| (リサイクル塩ビの場合 145) | | | | | |
| EM-CEE 3 × 2mm ² | 銅 | kg | 54 | 1.248 | 67 |
| | ポリエチレン | kg | 20 | 1.498 | 30 |
| | ポリプロピレン：介在 | kg | 9 | 0.964 | 9 |
| | ポリオレフィン | kg | 24 | 1.498 | 36 |
| | 合成水マグ 140部 | kg | 34 | 1.216 | 41 |
| | (天然水マグ 80部) | (kg) | (19) | (0.150) | (3) |
| | 木製ドラム | kg | 25 | 0.103 | 3 |
| | 電力 | kW・h | 157 | 0.422 | 66 |
| 合計 | | | | 252 | |
| (天然水マグの場合 214) | | | | | |

3. 7 あとがき

本章では、バージン PVC を用いた実験室レベルの実験で、塩ビは 2 回のライフサイクルに十分耐える材料であることを明らかにした。また、使用済み塩ビ電線から採取した塩ビをそのまま電線に再使用しても十分耐えるレベルにあることを確認し、同時に、ポリエチレンが 5%以下混入していても問題なく使えること、10%混入の場合でも、ポリマーアロイ技術を適用することで使用に耐えるレベルになることを明らかにした。一方、回収農ビの劣化は分子鎖の切断まで進んでいないことを確認し、再生配合により電線用として再使用できることを明らかにした。また、最後に LCA 分析を行い、リサイクル塩ビ電線は、製造時 CO₂ 排出量の観点からも極めて優れていることを確認した。

参考文献

- 1) 大澤善次郎、成澤郁夫、大西章義ほか：「高分子の寿命予測と長寿命化技術」、(株)エヌ・ティー・エス、p. 540 (2002)
- 2) 益尾和彦：「使用済み塩ビの電線への再利用技術と廃塩ビの埋め立て処理の実態」、電気設備学会誌、Vol. 27、No. 2、pp. 143～147 (2007)
- 3) JIS C 3340:2000「屋外用ビニル絶縁電線 (0W)」、日本規格協会 (2001)
- 4) 西方聡、益尾和彦、村上光平、権守仁彦、吉野勝美：「電気材料の環境対応技術」、電気材料技術雑誌、Vol. 12、No. 1、pp. 11～16 (2003)
- 5) 藤井光雄、垣内弘：「プラスチックの実際知識」、東洋経済新報社、pp. 205～210、pp. 278～281 (1968)
- 6) 本間精一：「プラスチックの実用強さと耐久性 7」、プラスチックス、Vol. 55、No. 4、pp. 143～152 (2005)

第Ⅱ部 電力ケーブルの導体サイズ適正化による

通電ロス低減・CO₂排出削減

第1章 サイズ適正化によるライフサイクルコストのミニマム化

1. 1 まえがき

第Ⅰ部では、電線の製造時に焦点を当て CO₂ 排出量の計算を行ったが、電線のライフサイクル全体で計算すると、製造時に比べ通電使用時の CO₂ 排出量突出して大きいことがわかる。通電使用時の CO₂ 排出量とは、通電による電力ロスを補うのに必要な電力を発電するために生じる CO₂ 量である。通電ロスを低減する方策として電圧の昇圧化と導体の太径化（サイズアップ）とが考えられるが、昇圧化がこれまで広く検討されているのに対して、サイズアップの検討は国内では過去に行われていないので、本章では、サイズアップによる CO₂ 排出削減について検討を行う。

検討の前提として、大きくすべき最適なサイズを決める必要があるが、これについては IEC 規格の経済性重視の考え方をベースとし、ライフサイクルコスト (LCC) がミニマムとなる最適サイズを決定する。また、年間に国内で布設されるケーブル全てをサイズアップし、それを 20 年間継続し、20 年後に、サイズアップ品への置き換えが日本全国で完了した時点での、年間 CO₂ 削減量を試算する。最後に、得られた試算結果をもとに、導体サイズアップと昇圧化による CO₂ 削減効果の比較を行う。

1. 2 電線使用時の通電ロス量・CO₂ 排出量と導体のサイズアップ

一般的に広く使用される低圧用の単心 3 個より架橋ポリエチレン (XLPE) 絶縁 PVC シースケーブル（以下、CV-T ケーブルと言う）で、標準的サイズの 3×14 mm² を対象に LCA 分析を行った。具体的には、ケーブルのライフサイクル（資源採掘→素材製造→電線製造→電線の施工→電線の使用→電線の解体→埋立・焼却）の各プロセスにおける CO₂ 排出量を、投入素材（導体の銅、絶縁体の XLPE、シースの PVC、ドラムの木、製造時の石油・電力・ガス、輸送時のガソリン、さらには電線使用時の電力ロスなど）のケーブル単位長さあたり投入量 (kg/km) に、

各素材の製造時における単位重量あたり CO₂ 排出量 (CO₂-kg/kg) を乗じて算出した。結果を 表Ⅱ.1.1 に示す。

ここで、‘電線の使用’のプロセスにおける CO₂ 排出量は、導体サイズ (14 mm²) に対し、許容電流値の半分の電流 (43 A) を、1 日に 15 時間、1 年に 200 日、それを 20 年間と、実際より短いと想定される期間通電される前提で算出した。

表Ⅱ.1.1 より、ライフサイクル全体の CO₂ 排出量 241 t/km のうち、‘電線の使用’のプロセスが 240 t/km で突出して大きく、この部分における対策が最も重要であることがわかる。

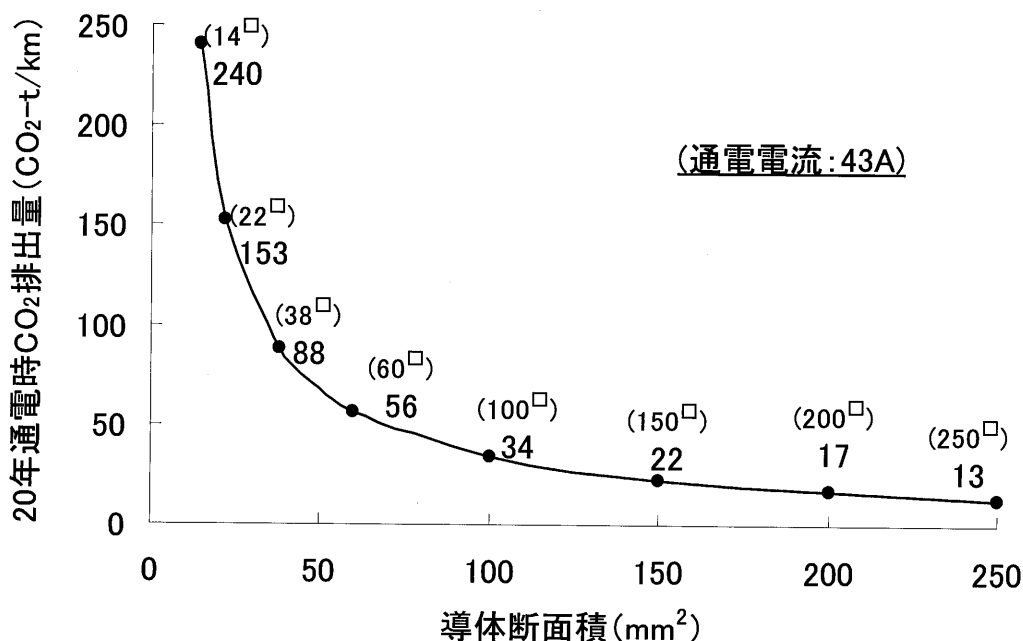
表Ⅱ.1.1 LCA 計算結果 (CV-T 3×14mm²) ¹⁾

| 電線のライフサイクル | CO ₂ 排出量 (CO ₂ -kg/km) |
|--|---|
| <div>資源採掘</div> <div>↓海上輸送</div> <div>素材製造</div> <div>↓輸送</div> <div>電線製造</div> <div>↓輸送</div> <div>電線の施工</div> <div>↓輸送</div> <div>電線の使用</div> <div>↓輸送</div> <div>電線の解体</div> <div>↓輸送</div> <div>埋立又は焼却</div> | <div>483 (導体)</div> <div>293 (絶縁体)</div> <div>263 (シース)</div> <div>213 (より合わせ ～ドラム巻き出荷)</div> <div>1,252 (小計)</div> |
| | 15 |
| | 240,087 |
| | 14 |
| | 12 |
| | 14 |
| | 15 (加重平均) |
| (合計) | 241,409 |

通電ロス、つまり CO₂ 排出量を低減する方策として、通電電力量を一定とした場合、(通電ロス) = (電流の二乗) × (導体抵抗) の関係より、電圧を昇圧 (例えば、100V→200V、200V→400V) して電流値を 1/2 に低減するか、または、導体サイズを大きくして導体抵抗を小さくするかが考えられる。ここでは、後者の導体サイズアップにつき検討する。

上記の通り 43A を 20 年間通電した場合を例に、導体サイズと CO₂ 排出量の関係を求めると 図Ⅱ.1.1 のようになる。図より、CO₂ 排出量は、サイズ (断面積) に反比例するため、1~2 サイズ上にサイズアップした時に CO₂ 排出量の低減率がきわめて大きくなることがわかった。具体的には、14[□]→22[□]では CO₂ 排出量

は64% にまで、さらに、14 \square →38 \square では37% にまで低減できる。なお、この低減率は通電電流の値に関係なく成り立つ。(□印はmm²の略号である。)



図Ⅱ. 1. 1 導体サイズ(断面積)とCO₂排出量の関係¹⁾

1. 3 ライフサイクルコストを考慮した最適導体サイズ

通電使用時のCO₂排出量は、導体サイズ(断面積)の増大に反比例して低減していく。そのため、CO₂排出量をミニマムにするサイズは無限に大きくなり、最適なサイズを決定することができない。

CO₂排出量とは別の観点からの規格として IEC 60287-3-2 規格²⁾が存在する。この規格は、イニシャルコスト(ケーブル製造コスト)にランニングコスト(通電ロス分の電力料金)を加えたライフサイクルコスト(LCC)の観点から、それがミニマムとなる導体サイズ決定の指針を示したものである。

以下では、IEC 規格に準じた検討を、日本における諸条件を勘案して行う。

1. 3. 1 ライフサイクルコスト

- (1) イニシャルコスト C_1 (¥/km) は、ケーブル製造コストであり、銅原料費、銅原料費以外 (XLPE、PVC、荷造りドラムなど) の材料費、及び加工費 (動力費、人件費) の3つからなり、それぞれの比率はおおよそ100対35対15 (2007年3月現在のコスト分析に基づく) であることから、次式で与えられる。

$$C_1 = W \times CU \times 1.5 \quad \dots\dots\dots (II. 1. 1)$$

W : ケーブル単位長さ当たりの銅重量 (kg/km)

CU : 銅価格 (銅建値) (¥/kg)

ここで、銅建値は、2007年3月現在の値を用い $CU=750$ ¥/kg とした。

- (2) ランニングコスト C_2 (¥/km) は、ケーブルの総通電時間中における通電ロス分の電力料金であり、次式で与えられる。なお、許容電流の場合と違い、ここでの通電電流値は小さく、導体温度上昇も小さいので、導体抵抗値は 20°C における値を用いた。

$$C_2 = n \times I^2 \times R \times 10^{-3} \times H \times M \quad \dots\dots\dots (II. 1. 2)$$

n : ケーブルの線心数

I : 通電電流 (A)

R : 20°C における導体抵抗値 (Ω/km)

H : ケーブル総通電時間 (hrs)

M : 電力料金 (¥/kWh)

ここで、ケーブルの線心数は、三相3線式の場合で $n=3$ とした。また、電力料金は、業務用の場合で $M=15$ ¥/kWh とした。

- (3) ライフサイクルコスト C_3 (¥/km) は次式となる。

$$C_3 = C_1 + C_2 \quad \dots\dots\dots (II. 1. 3)$$

1. 3. 2 諸定数の決定

導体サイズの決定は、初めに当該ケーブルの負荷 (電灯、空調、給湯、モーターなど) の定格電流値の総和が算出され、その値が、例えば、 22^\square の許容電流 (110A) と 38^\square の許容電流 (155A) の間であれば、上のサイズの 38^\square に決定され

る³⁾。従って、確率的には例えば 38[□] のケーブルに流れる電流は、当該サイズ (38[□]) とその下のサイズ (22[□]) それぞれの許容電流値を平均した $(155+110)/2 = 133 \text{ A}$ になると考えることができる。ビル・工場における 1 日 (24 時間) の負荷電流パターンについては、配電用変圧器の負荷パターン実態調査結果 (1 日の等価負荷率 50%)⁴⁾ がケーブルの場合にも適用できることから、その等価負荷率は 50% と考えることができる。以上より、通電電流 I は、例えば 38[□] のケーブルでは $133\text{A} \times 0.5$ (等価負荷率) = 66A と考えることができる。ケーブル総通電時間 H については、 $(24\text{hrs/日}) \times (200 \text{ 日/年}) \times (20 \text{ 年}) = 96,000\text{hrs}$ とした。ここで、年間稼働日数は、これ以下にはならない小さい側の日数として 200 日とした。ケーブル使用年数については、法定耐用年数 (償却年数) は建物で 26 年、付属電気設備 (ケーブルなど) は 15 年となっており、ケーブルの場合、実質的には建物に付随して使われ続けるので、これ以下にはならない小さい側の年数として 20 年とした。

1. 3. 3 計算結果

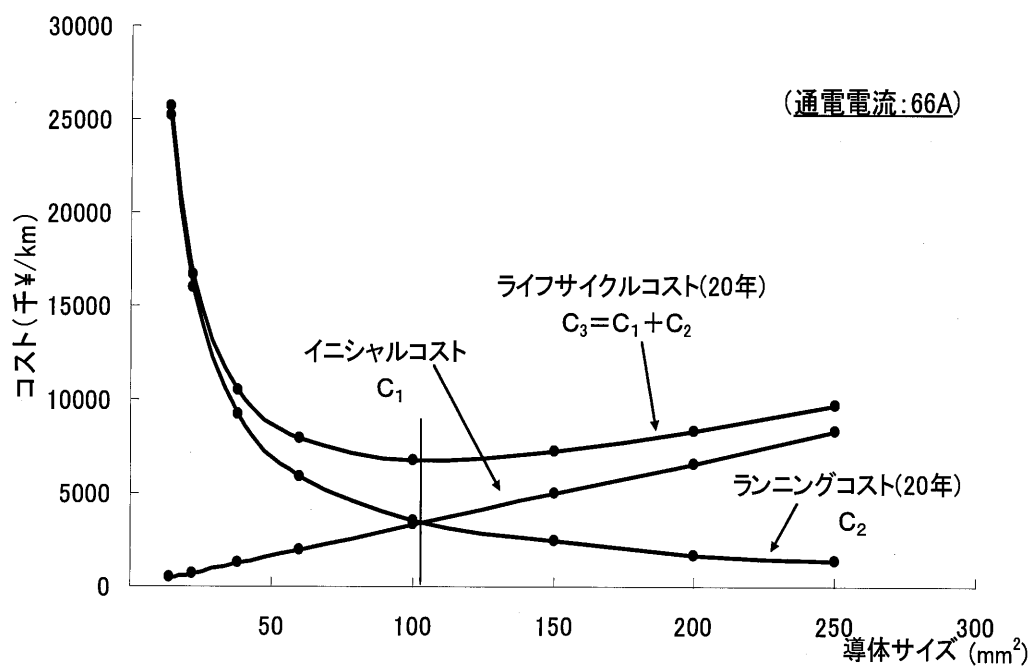
CV-T ケーブルの代表サイズの 38[□]、ならびに 22[□] ~ 150[□] を対象に、通電電流 I (66A) を 20 年間 (96,000hrs) 流した時のライフサイクルコスト C_3 を算出した。結果を 表 II. 1. 2 と 図 II. 1. 2 に示す。

図 II. 1. 2 より、導体サイズを大きくすると、イニシャルコスト C_1 は導体断面積にほぼ比例して増大するが、ランニングコスト C_2 は逆に反比例して減少する。 C_1 と C_2 の和であるライフサイクルコスト C_3 には最小値が存在する。この例の場合、最小値は 100 mm² 近傍となる。つまり、38[□] → 100[□] とサイズアップすることで、 C_3 は 10,500 → 6,800 千円/km へと約 2/3 に低減し、そこで最小 (ミニマム) になる。

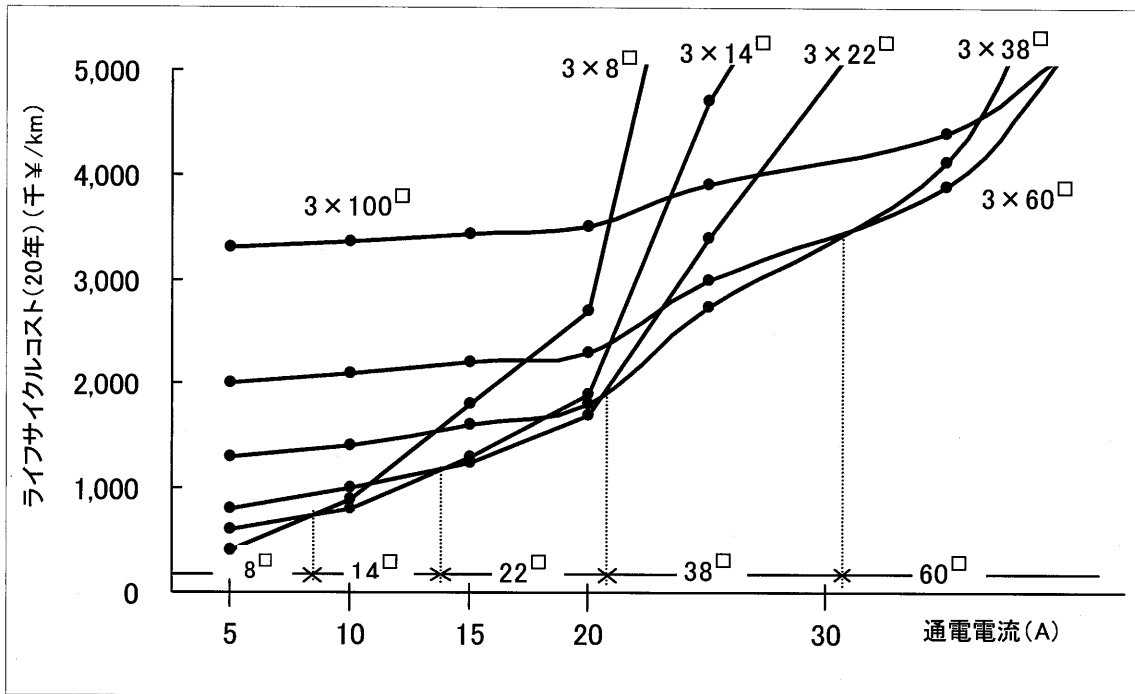
また、各導体サイズのケーブルのライフサイクルコスト C_3 を、通電電流 I を横軸にとって図示すると 図 II. 1. 3 ((b) 図 は (a) 図の続き) のようになる。これより、例えば、上記の $I=66\text{A}$ の場合、(b) 図中に入れた縦線に示す通り 325[□] → 38[□] → 250[□] → 200[□] → 60[□] → 150[□] → 100[□] の順にコストは小さくなり 100[□] が最適サイズとなる。また、サイズごとの曲線同士の交点位置から、各サイズそれぞれに最適電流値が決定できる。例えば、38[□] の場合、(a) 図下部に示す通り 21 ~ 31 A となる。同様にして得られた各サイズの最適電流値を 表 II. 1. 3 (左) に示す。さらに、各サイズの通電電流値から、サイズごとに大きくすべき最適サイズが決定できる。例えば、38[□] の通電電流値 (66 A) が、100[□] の最適電流値 (49 ~ 78 A) の間にあることから、100[□] が最適サイズとなる。同様にして得られた最適サイズを 表 II. 1. 3 (右) に示す。

表Ⅱ.1.2 一定電流通電時の各サイズにおけるライフサイクルコスト

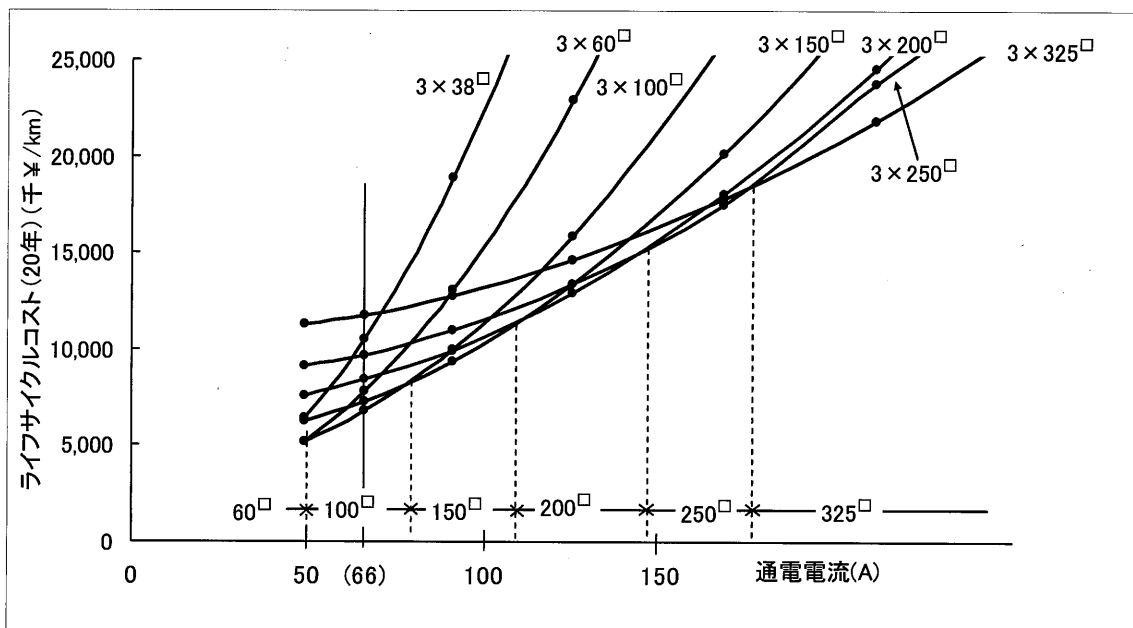
| | 単位 | 3×22 [□] | 3×38 [□] | 3×60 [□] | 3×100 [□] | 3×150 [□] |
|--|--------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| イニシャルコスト C_1 (銅建値750¥/kg ベース) | 千 ¥/km | 700 | 1,300 | 2,000 | 3,300 | 5,000 |
| 通電電流 I (38 [□] の場合) | A | 66 | 66 | 66 | 66 | 66 |
| 導体抵抗 R (at 20°C) | Ω/km | 0.849 | 0.491 | 0.311 | 0.187 | 0.124 |
| 通電ロス ($3 \times I^2 \times R$) | kW/km | 11.1 | 6.4 | 4.1 | 2.4 | 1.6 |
| 総通電時間 H | hrs | 96,000 | 96,000 | 96,000 | 96,000 | 96,000 |
| 電力料金(業務用) M | ¥/kWh | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| ランニングコスト(20年) C_2 ($3 \times I^2 \times R \times H \times M$) | 千 ¥/km | 16,000 | 9,200 | 5,900 | 3,500 | 2,300 |
| ライフサイクルコスト(20年) C_3 ($C_1 + C_2$) | 千 ¥/km | 16,700 | 10,500 | 7,900 | 6,800 | 7,300 |



図Ⅱ.1.2 導体サイズ(断面積)とライフサイクルコストの関係



(a) 図



(b) 図

図 II. 1. 3 各サイズにおける通電電流値とライフサイクルコストの関係

表Ⅱ. 1. 3 サイズごとの最適電流値と最適サイズアップの決定

| サイズ | LCCが最小となる最適電流値 | 最適導体サイズの決定 ()内数字は通電電流値 |
|--------------------|----------------|--|
| 3×8 [□] | ～8A | 3×8 [□] (27A)→3×38 [□] |
| 3×14 [□] | 8～14A | 3×14 [□] (37A)→3×60 [□] |
| 3×22 [□] | 14～21A | 3×22 [□] (49A)→3×60 [□] |
| 3×38 [□] | 21～31A | 3×38 [□] (66A)→3×100 [□] |
| 3×60 [□] | 31～49A | 3×60 [□] (91A)→3×150 [□] |
| 3×100 [□] | 49～78A | 3×100 [□] (125A)→3×200 [□] |
| 3×150 [□] | 78～108A | 3×150 [□] (168A)→3×250 [□] |
| 3×200 [□] | 108～147A | 3×200 [□] (211A)→3×325 [□] |
| 3×250 [□] | 147～175A | 3×250 [□] (250A)→3×325 [□] |
| 3×325 [□] | 175A～ | 3×325 [□] (293A)→(同左) |

1. 4 導体サイズアップによるCO₂排出量低減効果

前節では、ライフサイクルコスト (LCC) の観点から、大きくすべき最適なサイズを決定することができた。本節では、前節のサイズアップを実現した時のCO₂削減量を算出する。

年間に出荷される全てのケーブルをサイズアップした時の日本全国年間のCO₂削減量 Z_1 (CO₂-kg) は次式で与えられる。

$$Z_1 = \sum \{3 \times I^2 \times (R_1 - R_2) \times 10^{-3} \times H' \times L \times K_1\} \dots\dots\dots (Ⅱ. 1. 4)$$

I : 通電電流 (A)

R_1 : サイズアップ前サイズの導体抵抗値 (Ω/km)

R_2 : サイズアップ後サイズの導体抵抗値 (Ω/km)

H' : ケーブル年間通電時間 (200 日 = 4, 800 hrs)

L : ケーブル年間出荷長 (km)

K_1 : 単位電力量発電時のCO₂排出量 (CO₂-kg/kWh)

また、サイズアップにより、年間の銅生産量が増大することになるが、それによる日本全国年間のCO₂増加量 Z_2 (CO₂-kg) は次式で与えられる。

$$Z_2 = \sum \{(W_2 - W_1) \times L \times K_2\} \dots\dots\dots (Ⅱ. 1. 5)$$

W_1 : サイズアップ前サイズの単位銅導体重量 (kg/km)

W_2 ：サイズアップ後サイズの単位銅導体重量 (kg/km)

L ：ケーブル年間出荷長 (km)

K_2 ：単位銅量生産時の CO_2 排出量 (CO_2 -kg/kg)

ケーブル年間出荷長 L については、過去 3 年間（2004～2006 年度）の CV-T ケーブル出荷データを抽出して求めた⁵⁾。結果を 表Ⅱ.1.4 に示す。CV-T は、販売ルートより判断して、全部が国内の建設・電販市場向けに出荷されており、電線の輸出入通関実績⁵⁾ によると輸入も輸出もないので、その出荷長がそのまま国内のビル・工場での布設長と考えてよい。なお、表Ⅱ.1.4 から、CV-T の合計出荷銅量は 189 千 t であり、これは電線総出荷銅量 850 千 t⁵⁾ の約 1/4 に相当することがわかる。

表Ⅱ.1.4 CV-T ケーブル年間出荷長とその銅量

| サイズ (単位銅量(kg/km)) | 出荷長L(km) | 出荷銅量(千t) |
|----------------------------|----------|----------|
| 3× 8 [□] (235) | 3,010 | 0.7 |
| 3× 14 [□] (411) | 15,360 | 6.3 |
| 3× 22 [□] (646) | 13,830 | 9.0 |
| 3× 38 [□] (1116) | 15,260 | 17.0 |
| 3× 60 [□] (1762) | 13,360 | 23.5 |
| 3× 100 [□] (2937) | 12,940 | 37.9 |
| 3× 150 [□] (4406) | 9,450 | 41.6 |
| 3× 200 [□] (5874) | 5,280 | 30.9 |
| 3× 250 [□] (7343) | 2,060 | 15.1 |
| 3× 325 [□] (9545) | 740 | 7.0 |
| 合計 | 91,290 | 189.0 |

単位電力量発電時の CO_2 排出量 K_1 は 0.425 CO_2 -kg/kWh⁶⁾、単位銅量生産時の CO_2 排出量 K_2 は 2.383 CO_2 -kg/kg⁷⁾ とした。

例えば 38[□] (66A 通電) → 100[□] のサイズアップの場合、低減電力量が $3 \times 66^2 \times (0.491 - 0.187) \times 10^{-3} \times 4,800 \times 15,260 = 290$ 百万 kWh であるので、 $Z_1 = 290 \times 0.425 = 120$ 千 t となり、また、増加銅量が $(2,937 - 1,116) \times 15,260 = 28$ 千 t であるので、 $Z_2 = 28 \times 2.383 = 66$ 千 t となる。すべてのサイズの計算結果を表Ⅱ.1.5 に示す。

表Ⅱ. 1. 5 導体サイズアップによる年間 CO₂ 排出量の増減

| サイズアップ | 通電ロス減による 低減電力量 (百万kWh) | 左記による CO ₂ 低減量 Z ₁ (CO ₂ —千t) | 銅生産量増による 増加銅量 (千t) | 左記による CO ₂ 増加量 Z ₂ (CO ₂ —千t) |
|--|------------------------------|--|--------------------------|--|
| 3× 8 [□] →3× 38 [□] | 60 | 30 | 3 | 6 |
| 3× 14 [□] →3× 60 [□] | 310 | 130 | 21 | 49 |
| 3× 22 [□] →3× 60 [□] | 260 | 110 | 15 | 37 |
| 3× 38 [□] →3× 100 [□] | 290 | 120 | 28 | 66 |
| 3× 60 [□] →3× 150 [□] | 300 | 130 | 35 | 84 |
| 3× 100 [□] →3× 200 [□] | 270 | 120 | 38 | 91 |
| 3× 150 [□] →3× 250 [□] | 190 | 80 | 28 | 66 |
| 3× 200 [□] →3× 325 [□] | 120 | 50 | 19 | 46 |
| 3× 250 [□] →3× 325 [□] | 30 | 10 | 5 | 11 |
| 3× 325 [□] →(同左) | — | — | — | — |
| 合計 | 1,830 ↓ 1,740 (5%減) | 780 ↓ 740 (5%減) | 192 | 456 ↓ 479 (5%増) |

表Ⅱ. 1. 5 の最下行の数値の修正は次の理由による。出荷ケーブル長のうち約 5 % (電線販売会社の内部データより) は、ドラムから切り取り後の残品や布設時の余尺品として廃棄され、実際には布設通電されないため、通電ロス減による低減電力量の合計は $1,830 \times 0.95 = 1,740$ 百万 kWh となり、CO₂ 低減量 Z₁ の合計も $780 \times 0.95 = 740$ 千 t となる。また、銅生産量増による CO₂ 増加量 Z₂ の合計は、ケーブル生産段階で約 5 % (電線メーカーの内部データより) の製造余尺が廃棄されることを考慮し、 $456 \times 1.05 = 479$ 千 t とする必要がある。

表Ⅱ. 1. 4 と表Ⅱ. 1. 5 より、銅生産量増による増加銅量が 192 千 t であることから、出荷銅量は 189 千 t から $189 + 192 = 381$ 千 t へとほぼ 2.0 倍になる。従って、表Ⅱ. 1. 3 (右) で決定した導体サイズの増大は、加重平均すると断面積でほぼ 2.0 倍の増大になったことになる。

国内で年間に布設される全てのケーブルをサイズアップした時の CO₂ 低減量は Z₁ - Z₂ で得られる。これを 20 年間継続し、20 年後に、サイズアップ品への置き換えが日本全国で完了した時点での、年間 CO₂ 低減量を試算した。結果を図Ⅱ. 1. 4 に示す。図より、1 年目は、通電ロス減による低減量 0.74 百万 t から銅

生産量増による増加量 0.479 百万 t を差し引き、約 0.3 百万 t の低減となる。2 年目は、前年の布設品による低減量 0.74 百万 t がそのまま上乗せされ、約 1.0 百万 t の低減となる。3 年目は、前々年と前年の布設品による低減量 2×0.74 百万 t がそのまま上乗せされ、約 1.7 百万 t の低減となる。そして最終の 20 年後（21 年目以降）には、14.8 百万 t の低減となる。これは、京都議定書の基準年度（1990 年）における日本全国総 CO₂ 排出量（1,261 百万 t⁸⁾）の 1.17 % に相当する。

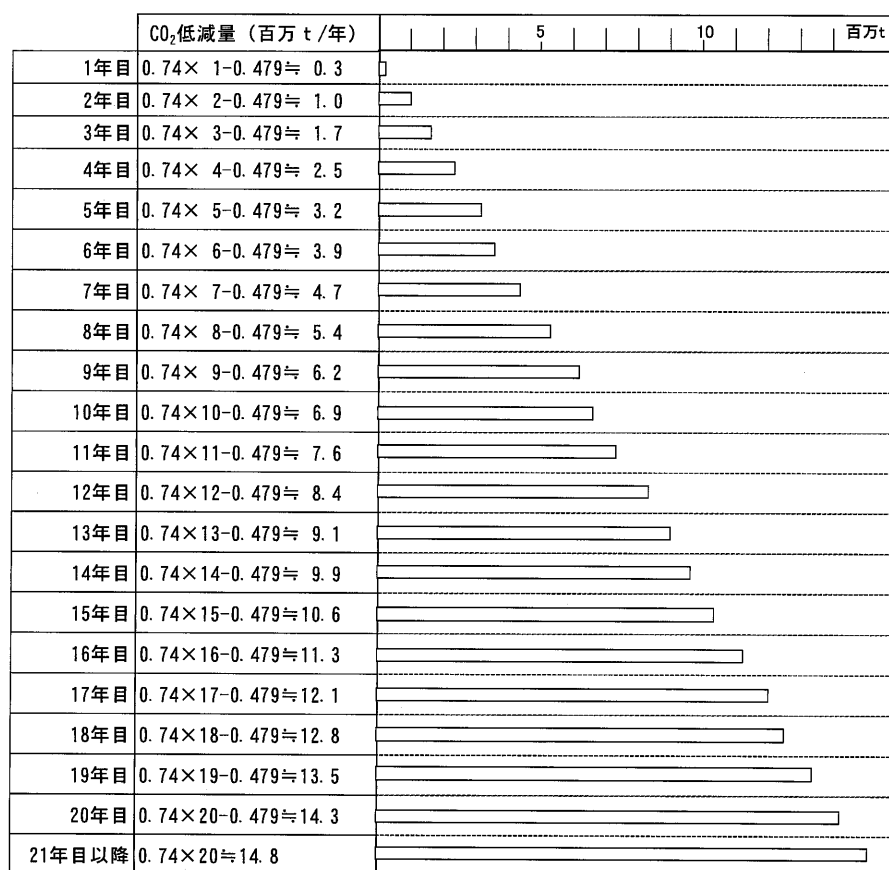


図 11.1.4 導体サイズアップによる CO₂ 低減量の推移

表 11.1.5 より、20 年後における通電ロス減による年間低減電力量は、(1,740 百万 kWh) \times (20 年) \approx 350 億 kWh となる。これは 110 万 kW 級大規模発電所 (1 基当たり 77 億 kWh (80%稼働)) 4~5 基分に相当する。平均 2.0 倍にサイズアップすることで、通電ロスを 350 億 kWh 低減できるということは、逆算すると、現状の通電ロスは $350 \times 2.0 = 700$ 億 kWh であることになる。電気事業連合会発表

データ 9), 10) によると、2006 年度の日本全国の発電所 (火力、水力、原子力ほか) で発電された総発電電力量は 9,710 億 kWh で、発電端から需要家受電端までの送配電ロスはその 7% の 680 億 kWh と報告されている。今回、それとは別に需要家受電端から各負荷端までの通電ロスとして、さらに 700 億 kWh (約 7%) もあるという新しい知見が得られたことになる。また、併せてサイズアップによりその 7% が 3.5% に半減できることになる。

1. 5 サイズアップと昇圧化の CO₂削減効果比較

前述の通り、低圧配電ケーブルによる通電ロスを低減する方策として、電圧の昇圧化と導体サイズアップとが考えられるが、昇圧化については、岩船、村越ら 11) により、電協研試算 12) に基づき、全国一律に 6kV/200V&100V 配電方式から 20kV/400V/230V 配電方式へ変更した時の CO₂低減効果の試算が行われている。この試算においては、電力会社の供給設備では、400V 供給により従来の 6.6kV の中間的な設備 (電線ケーブルも含まれる) が省略でき、かつ一般家庭等の需要設備では、単相 3 線式→三相 4 線式による 230V 昇圧化で、大幅な電力損失の低減 (需要家配線の電線ケーブルはそのまま使用が前提) が図れるとしている。

具体的な試算手順として、まず、需要種類別 (事務所ビル、集合住宅、一般住宅) 及び需要規模別の標準モデルを設定し、それぞれで CO₂低減効果を詳細に算出した後、需要種類・需要規模の異なる 4 地域 (都市部超過密地区、都市部過密地区、高層住宅地区、一般住宅地区) に分類する。次に、それぞれ 2 地点合計 8 地点の実地域モデルを選定してその CO₂低減効果を算出し、最後に、同じ需要種類・需要規模をもつ地域の全国面積を、固定資産の地域区分別地積 (面積) より推計し、それをもとに実地域モデルごとの全国比率 (面積) を求め、それを掛け算して最後に日本全国の CO₂低減量を算出している。

その試算結果は次の通りである。まず、受電設備、屋内配線など需要家設備における電力ロス低減量は年間 90~120 億 kWh (110 万 kW 級大規模発電所 1~2 基分弱に相当) となり、それによる CO₂低減量は年間 3.3~4.25 百万 t となる。

一方、電力会社の供給設備では負担区分の変化によって電力ロスは逆に 60 億 kWh 増大し、それによる CO₂増加量は年間 2.0 百万 t となる。最終的に、増減合わせて、電力ロス低減量は年間 30~60 億 kWh、CO₂低減量は年間 1.3~2.25 百万 t となると報告されている。

以上より、CO₂低減効果は、昇圧化が 1.3~2.25 百万 t/年 であるのに対し、導体サイズアップは 14.8 百万 t/年 (21 年目以降) であり、例えば、図 II.1.4 からわかる通り、4 年目から 2.5 百万 t/年 となることより、その時点で昇圧化

を越えることになる。このように、導体サイズアップの方がより効果的であることがわかったが、さらに、実際に実施に移すにあたり、昇圧化は韓国での実施例¹³⁾（1973年に開始～2005年に完了）に見られる通り、長い期間をかけて多くの課題（配電方式・接地方式の変更、電気機器類と端末の変更、電線・ケーブルと端末の変更、家電機器類と端子の変更、感電・火災に対する安全対策など）をクリアしなければならないのに対し、導体サイズアップは極めて容易であると考えられる。

1. 6 あとがき

IEC規格に準じ検討した結果、導体サイズを平均2倍に大きくすることで、ライフサイクルコスト(LCC)をミニマムにできることがわかった。また、年間に国内で布設されるCV-Tケーブル全てをサイズアップし、それを20年間継続し、21年目にサイズアップ品への置き換えが日本全国で完了した時点でのCO₂低減量は、14.8百万t/年になることがわかった。これは日本全国総CO₂排出量(1,261百万t/年)の1.17%に相当するもので、予想外に大きな削減効果であると言える。

発電端から需要家受電端までの送配電ロス(7%)についてはよく知られていたが、今回、受電端以降の需要家構内を各負荷端まで網の目状に多数布設された低圧ケーブルでの通電ロスが、さらに7%もあることを初めて明らかにし、併せて、サイズアップによりその7%が3.5%に半減できることを示すことができた。最後に、CO₂削減効果では、導体サイズアップが昇圧化より有効であることを明らかにした。

参考文献

- 1) 益尾和彦：「LCAを重視した電線ケーブルの環境配慮設計」、電気と工事、Vol. 47、No. 1、pp. 79～85 (2006)
- 2) IEC 60287-3-2-am1「Electric cables - Calculation of the current rating - Part 3 : Sections on operating conditions - Section 2 : Economic optimization of power cable size」(1996)
- 3) 森村和三：「オール電化集合住宅、配線設計のポイント」、電気と工事、Vol. 49、No. 2、pp. 36～42 (2008)

- 4) 松原秀勇：「三菱配電用トップランナー油入変圧器 N シリーズの開発」、産業と電気（関西電気協会）、Vol. 654、No. 3、pp. 56～60、図 6（2007）
- 5) 電線統計年報（会員用）：2007 年、2006 年、2005 年各年度版、（社）日本電線工業会発行
- 6) 電気事業連合会：「電気事業における環境行動計画」（2006 年 9 月 22 日）、p. 3 <2005 年度の実績>
- 7) （財）電力中央研究所：「都市インフラストラクチャー構築の資源使用量と環境負荷」、電力中央研究所報告 Y95011（1995）
- 8) 芝田克明：「最近のエネルギーをめぐる動き」、産業と電気（関西電気協会）、Vol. 654、No. 3、p. 12（2007）
- 9) 電気事業連合会：「電気事業における環境行動計画」（2007 年 9 月）、
<http://www.fepc.or.jp/env/report/2007.pdf>、p. 13
- 10) 電気事業連合会：「2007 年度の発受電速報」（2008 年 4 月 15 日）、
<http://www.fepc.or.jp/news/hatsu/2007.pdf>、表 1
- 11) 岩船由美子、村越千春ほか：「配電電圧昇圧による省エネルギー・CO₂削減効果の評価（電力流通設備における影響）」、（株）住環境計画研究所（2002）
- 12) （社）電気協同研究会：「20kV 級 / 400V 配電方式普及拡大技術」、電気協同研究、Vol. 56、No. 3（2001）
- 13) 崔光石、本山建雄、中田健司、鄭載喜：「日韓における配電方式」、電気と工事、Vol. 47、No. 9、pp. 56～61（2006）

第2章 ビル・工場及び住宅の低圧配線を対象とした

電線・ケーブル (CV-T, VVF) の導体サイズアップの検討

2. 1 まえがき

前章の結果を踏まえて、本章では、導体サイズアップをビル・工場の CV-T ケーブル及び住宅の VVF ケーブル（平型ビニル絶縁ビニルシースケーブル）を対象に進めるにあたり、技術的諸課題への対応策について検討する。

ビル・工場の低圧 CV-T ケーブルについては、ケーブル表面の温度上昇を測定することにより、取り替えの対象ケーブルを特定することを考え、まず、通電ロスによるケーブル表面温度上昇値をサイズアップ前後のそれぞれのケーブルにて計算を行う。次に、工場の実現場にて、サイズアップ前後それぞれのケーブルを用いて1ヶ月間の通電実験を行い、両ケーブルの通電ロス量 (kWh) と表面温度上昇値を測定し、測定値と計算値の比較を行う。

住宅の VVF ケーブルについては、サイズアップしてもたわみ性を損なわない複合構造の新規ケーブルを開発し、エコキュートと IH クッキングヒータの電源電線を対象に、新規ケーブルに取り替えた時の電線1本あたりの通電ロス低減量を算出する。

2. 2 通電ロスによるケーブル表面温度の上昇

導体で生じる通電ロスによるジュール熱は、導体→絶縁体→シース→ケーブルの周囲へと放散され、その放散のしやすさの程度に応じ導体の温度が決まる。即ち、図 II. 2. 1 に示すケーブルの熱回路図において、温度差 ($\theta_1 - \theta_2$)、熱流 (mI^2r)、熱抵抗 ($R_1 + R_2 + R_3$) を、それぞれ電気回路における電圧、電流、抵抗に置き換えて考えるとオームの法則が成り立ち、導体の温度上昇 ($\theta_1 - \theta_2$) (°C) は次式で求まる。

$$\theta_1 - \theta_2 = mI^2r \times (R_1 + R_2 + R_3) \quad \cdots \cdots \cdots (\text{II. 2. 1})$$

θ_1 : 導体の温度 (°C)

θ_2 : 基底温度 (°C)

m : ケーブルの線心数 (3 個よりの場合、 $m=1$)

I : 通電電流 (A)

r : 20℃における導体抵抗 (Ω/cm)

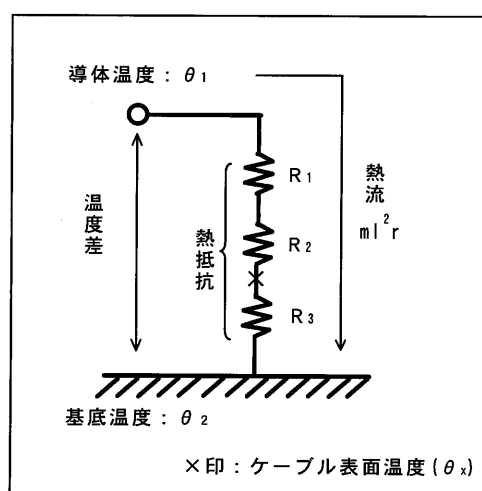
R_1 : 絶縁体の熱抵抗 (℃・cm /W)

R_2 : シースの熱抵抗 (℃・cm /W)

R_3 : 表面放散熱抵抗 (℃・cm /W)

図Ⅱ. 2. 1 中、×印を付けた箇所の温度 θ_x がケーブル表面の温度を表すので、ケーブル表面の温度上昇 ($\theta_x - \theta_2$) (℃) は次式で求まる。

$$\theta_x - \theta_2 = mI^2 r \times R_3 \quad \dots\dots\dots (\text{Ⅱ. 2. 2})$$



図Ⅱ. 2. 1 CV-T ケーブルの熱回路図

標準的サイズの 38□ を 100□ へサイズアップした場合で、ケーブル表面の温度上昇値 ($\theta_x - \theta_2$) の低下値を計算する。

まず、表面放散熱抵抗 R_3 (℃・cm/W) は、JCS 規格 ¹⁾ に基づき次式で求められる。

$$R_3 = 30 \rho / 2.16 \pi d \quad \dots\dots\dots (\text{Ⅱ. 2. 3})$$

ρ : 表面放散固有熱抵抗 (℃・cm/W)

d : ケーブル(単心)の外径 (mm)

38□の場合は、 $(30 \times 800) / (2.16 \times \pi \times 13.0) = 272$ ℃・cm/W となり、100□の場合は、 $(30 \times 900) / (2.16 \times \pi \times 19.3) = 206$ ℃・cm/W となる。

また、 I (通電電流) = I_{\max} (最大負荷電流) $\times k$ (負荷率) の関係から、通電電流 I は毎時刻ごとの負荷率 k の変動に応じ変化するものとし、負荷率 k の変動は一般工場における1日の負荷電流パターン²⁾を用いる。

次に、ケーブル表面の温度上昇値 ($\theta_x - \theta_2$) を求める。 38^\square の場合、通電電流 I は $133 \times k$ (前節 p. 53 で導出している) より、 $\theta_x - \theta_2 = 1 \times (133 \times k)^2 \times 0.491 \times 10^{-5} \times 272 = 23.6 \times k^2$ となる。 100^\square の場合、通電電流 I は 38^\square の場合と同じ $133 \times k$ より、 $\theta_x - \theta_2 = 1 \times (133 \times k)^2 \times 0.187 \times 10^{-5} \times 206 = 6.8 \times k^2$ となる。この2つの式に、負荷電流パターンにおける毎時刻の負荷率 k の値を代入し、 38^\square と 100^\square の ($\theta_x - \theta_2$) を求めた。結果を 図 II. 2. 2 に示す。これより、サイズアップ前の 38^\square は最大 10°C 程度の上昇であるのに対し、サイズアップ後の 100^\square は 3°C 程度の上昇であることがわかった。(上記の計算は 38^\square で行ったが、 38^\square 以外のサイズでも同じように 10°C 程度の上昇という結果になる。)

また、上記 38^\square の場合の式 $\theta_x - \theta_2 = 23.6 \times k^2$ ($^\circ\text{C}$) で、 k に 10% から 100% までの値を代入して、それぞれで $\theta_x - \theta_2$ を求めると、 0.2°C (10%)、 0.9°C (20%)、 2.1°C (30%)、 3.8°C (40%)、 5.9°C (50%)、 8.5°C (60%)、 11.6°C (70%)、 15.1°C (80%)、 19.1°C (90%)、 23.6°C (100%) となった。このように、通電電流とケーブル表面の温度上昇との相関関係が得られることで、多数のケーブルが輻輳して布設された現場で、取り替え対象ケーブルを容易に特定することが可能になり、例えば、 10°C を越えるものから優先して取り替えるなど現実的な対応策を取ることができる。

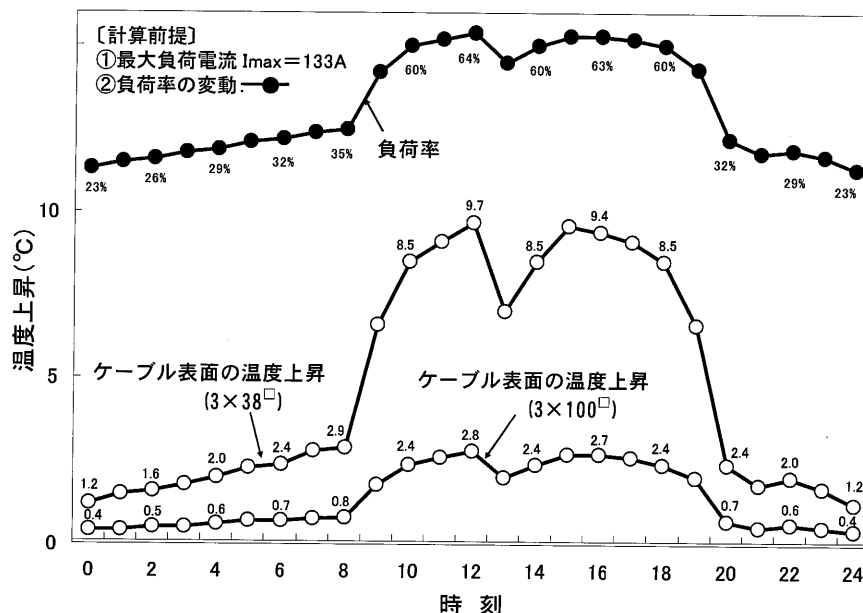


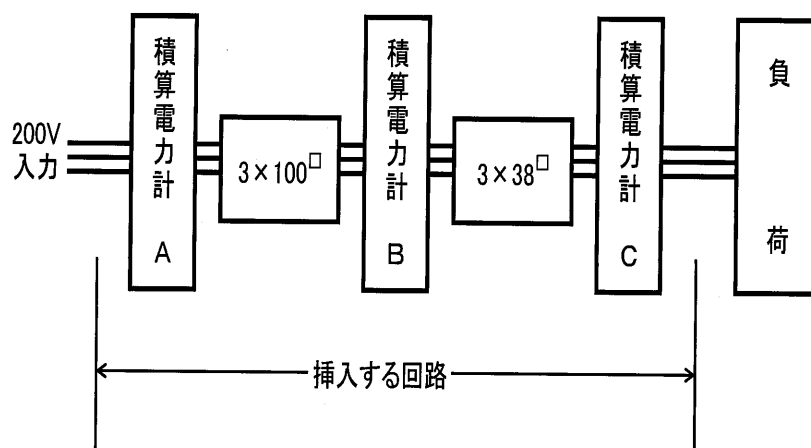
図 II. 2. 2 ケーブル表面の温度上昇計算値の変化

2. 3 通電ロス量とケーブル表面温度の実測実験

代表サイズ(38[□])のケーブルを用い、それをサイズアップ(38[□]→100[□])した時のケーブルの通電ロス低減量(kWh)と、ケーブル表面の温度上昇値の低下値を求める実験を行った。

まず、同じ長さ(50 m)の3×38[□]と3×100[□]の2本のCV-Tケーブル及び積算電力計(A、B、C)を直列に接続した回路を用意し、これを工場のクリーンルーム用エアコン負荷(210V、15kW)の給電ケーブルとして既設ケーブルに取り換え挿入した。(図Ⅱ.2.3 参照) この回路で、通常通り作業を行い1ヶ月間(8月末～9月末)負荷電流を流し続けた後、積算電力計A、B、Cの積算電力量(kWh)を読み取った。AとBの読みの差、BとCの読みの差が、それぞれ100[□]と38[□]の通電ロス量(kWh)を表すことになる。1ヶ月間(600 hrs)の実測結果は、24 kWh(100[□])と60 kWh(38[□])となり、その比率は $24/60=0.40$ となった。なお、図Ⅱ.2.4に1ヶ月間の通電ロス(kW)の変化を示す。また、事前の測定で、両ケーブルの28℃における自身長(50 m)の導体抵抗値は、それぞれ0.0096Ω(100[□])と0.0238Ω(38[□])であり、比率は $0.0096/0.0238=0.40$ となった。

本実験では、両ケーブルは直列接続のため常に同一電流が流れるので、両ケーブルの通電ロス量はそれぞれの導体抵抗値に比例することになるが、上記の通り、両ケーブルの通電ロス量の比率と導体抵抗値の比率とがほぼ一致したことで、理論通りの結果になることを確認した。



図Ⅱ.2.3 通電ロス量測定のための実験回路

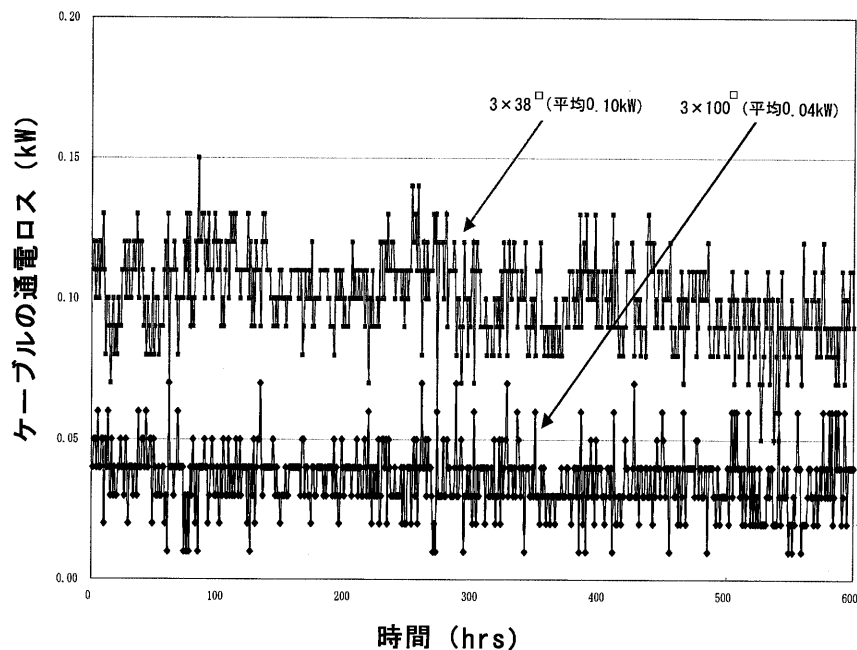


図 11.2.4 ケーブルで生じる通電ロス (kW) の変化

次に、ケーブル表面の温度測定を熱電対を用いて行った。(図 11.2.5 参照)
 実測結果は 図 11.2.6 に示す通りで、通電電流が 36A では、100[□]ケーブルの表面温度上昇は $29.5 - 28.9 = 0.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ となり、38[□]では $30.8 - 28.9 = 1.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ となった。計算値は、前節の式 (11.2.2) より、100[□]の場合 $\theta_x - \theta_2 = 1 \times 36^2 \times 0.187 \times 10^{-5} \times 206 \div 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、38[□]の場合 $\theta_x - \theta_2 = 1 \times 36^2 \times 0.491 \times 10^{-5} \times 272 \div 1.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ となり、実測値と計算値はほぼ一致した。

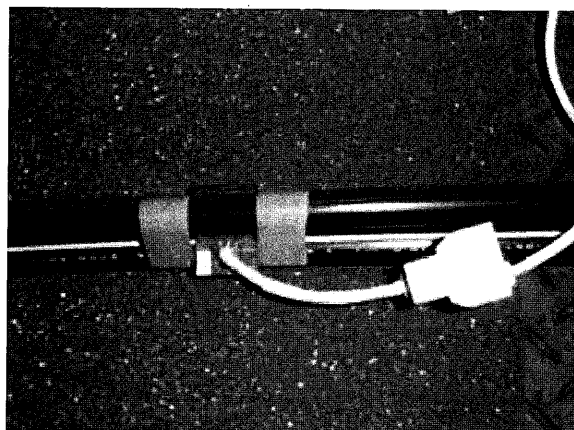


図 11.2.5 ケーブル表面温度の測定状況 (3×38[□]ケーブルの例)

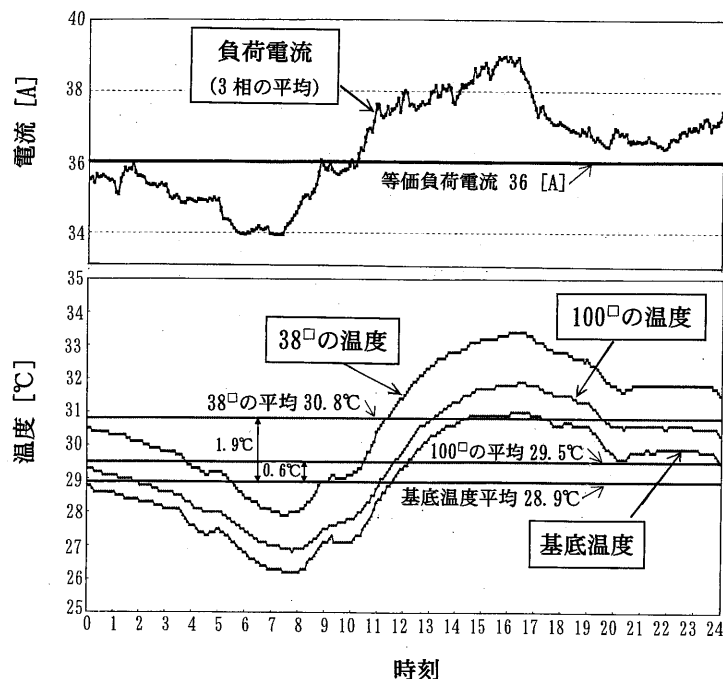


図 II. 2. 6 1日の負荷電流曲線とケーブル表面の温度上昇データ

2. 4 住宅用 VVF ケーブルの導体サイズアップ

日本の住宅（集合と戸建）への配電方式は、単相 3 線式 (100/200V) または V 結線電灯動力共用方式 (100/200V) が一般的であり、柱上変圧器から引込線により各需要家に電力が供給される。また、各需要家の電力量計または分電盤以降は、100V 配線と 200V 配線ともに VVF ケーブルが使用されている。本節では VVF ケーブルを対象に導体サイズアップの検討を行う。

初めに、導体サイズアップに伴い通電電流が若干増加し、それにより消費電力が増大する問題を 図 II. 2. 7 に基づき説明する。単相 100V の照明負荷回路（電圧降下 4 %）を例に、サイズアップにより VVF の導体抵抗が $2r \rightarrow r$ と半分になった時の通電電流の変化を求める。給電電圧 V はバックパワーが大きいことから常に一定を前提にした。計算の結果は、図 II. 2. 7 中の計算式に示すように、サイズアップ前の電流 I は $0.0100 \times (V/r)$ であるのに対し、サイズアップ後の電流 I' は $0.0102 \times (V/r)$ で、2 % 増加することがわかる。

以上の I と I' の値に基づき、サイズアップによるメリットとデメリットを定量的に表すと 表 II. 2. 1 の通りとなる。表中 (3) の消費電力 W の増大は必ずしもデメリットではないが、省エネには逆行することになる。例えば、フィードバック機能（明るくなりすぎると自動的に暗くなる）のない照明負荷の場合に

は、サイズアップによりそれ以前より明るくなり、その分消費電力が増大するという問題がある。それに対し、給湯、厨房、冷暖房、動力などの電気機器が負荷の場合は、フィードバック機能があるため同様な問題はない。つまり、給湯器、厨房機器、冷暖房機のように一定の温度になるとリミットが働くとか、モーターのように一定の回転数になると自動的に出力が落ちるとか、サイズアップにより運転中の消費電力が増えても、より短い時間で仕事を終了するので、消費電力量（kWh）としては増えることにはならないからである。以上より、住宅における VVF ケーブルのサイズアップの対象に照明負荷は適当でないと判断した。

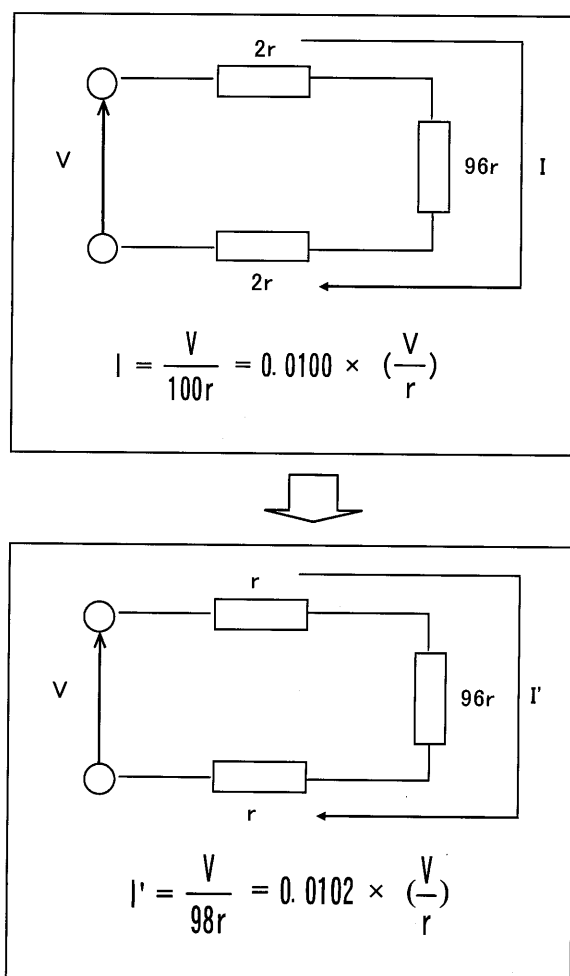


図 II. 2. 7 サイズアップによる通電電流値の増加

表Ⅱ. 2. 1 サイズアップによるメリットとデメリット

| |
|---|
| <p>(1) ケーブルの通電ロス L の低減 (メリット)</p> $L = I^2 \times 4r = 0.0004 \times \left(\frac{V^2}{r}\right) \rightarrow L = (I')^2 \times 2r = 0.0002 \times \left(\frac{V^2}{r}\right)$ |
| <p>(2) 電圧降下 ΔV の改善 (メリット)</p> $\Delta V = I \times 4r = 0.0400 \times V \rightarrow \Delta V = I' \times 2r = 0.0204 \times V$ |
| <p>(3) 消費電力 W の増大 (デメリット)</p> $W = I^2 \times 100r = 0.0100 \times \left(\frac{V^2}{r}\right) \rightarrow W = (I')^2 \times 98r = 0.0102 \times \left(\frac{V^2}{r}\right)$ |

我が国ではオール電化住宅の普及に伴い大容量の 200V 配電機器の使用が増大しており、とりわけ、ヒートポンプ給湯機（通称エコキュート）と IH クッキングヒータの普及はめざましいが、ここで、深夜電力使用のエコキュートの 1 日の総通電時間が長い点と、IH クッキングヒータの通電電流が大きい点とに着目し、以下ではこの 2 つの機器の電源配線に使用される VVF ケーブルを対象に導体のサイズアップの検討を行う。

200V 用の VVF には 3 心型 (2.0mm) が主に使用されている。上のサイズとしては 3 心型 (2.6mm) があり既に一部で使用されているが、このサイズにするとケーブルのたわみ性が損なわれ、壁の中や床の下など狭い箇所での配線に支障を来すという問題がある。そこで、単相 3 線式では 3 心のうち 1 心は接地線で電流が流れないことから、電流の流れる 2 心は 2.0mm (3.1 mm² 相当) → 5.5mm² にサイズアップし、電流の流れない 1 心は逆に 2.0mm → 1.6mm にサイズダウンした複合構造のケーブル（以下、複合型 (5.5mm²) という）を新規に考えた。ここで、5.5mm² については、たわみ性を考慮して、単線ではなくより線 (1.0mm の単線を 7 本より合わせたもの) に変更した。複合型 (5.5mm²) の構造図を 図Ⅱ. 2. 8 に、構造寸法と導体抵抗値を、3 心型 (2.0mm) および 3 心型 (2.6mm) と比較して、表Ⅱ. 2. 2 に示す。

複合型 (5.5mm²) ケーブルを実際に試作し、図Ⅱ. 2. 9 に示すたわみ性試験を行った。試験の結果を 図Ⅱ. 2. 10 に示す。たわみ性を優れた順に ◎、○、△、× で表すと、複合型 (5.5mm²) は ◎、3 心型 (2.0mm) は ○、3 心型 (2.6mm) は × となる。5.5mm² と 2.6mm を比較すると、導体断面積 (導体抵抗値) では殆ど違いはないが、ケーブル短径では 5.5mm² の方が大きく、たわみ性では不利と

考えられたが、たわみ性試験の結果から 5.5mm^2 の方が 2.6mm に比べても、また 2.0mm に比べても優れた結果が得られたことから、単線をより線に変えた効果の大きいことが明らかとなった。なお、試験温度が低くなると、被覆材（ビニル）の低温硬化による影響でたわみ量は小さくなるが、 2.6mm は試験温度に関係なく常にたわみ量が小さい。これより、ケーブル全体のたわみ性は、 2.6mm の場合、被覆材より導体の剛性に依存することがわかった。

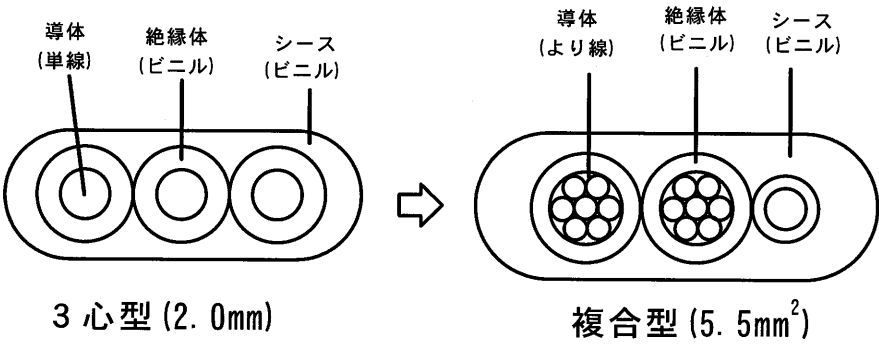


図 II. 2. 8 VVF ケーブルの新規サイズアップ品の断面図 ³⁾

表 II. 2. 2 VVF ケーブルの構造寸法と導体抵抗値 ³⁾

| | 3心型(2.0mm) | 3心型(2.6mm) | 複合型 $\left[\begin{matrix} 2 \times 5.5\text{mm}^2 \\ 1 \times 1.6\text{mm} \end{matrix} \right]$ |
|-------------------------------------|------------|------------|---|
| 導体構成 | 2.0mm単線 | 2.6mm単線 | 1.0mm単線の7本より 1.6mm単線 |
| ケーブル外径(mm) (短径×長径) | 6.6×13.8 | 7.6×16.8 | 8.0×16.2 |
| 導体抵抗(20℃) (Ω/km) | 5.65 | 3.35 | 3.33 8.92 |

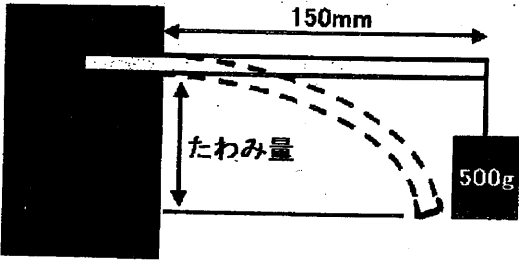


図 II. 2. 9 たわみ性試験

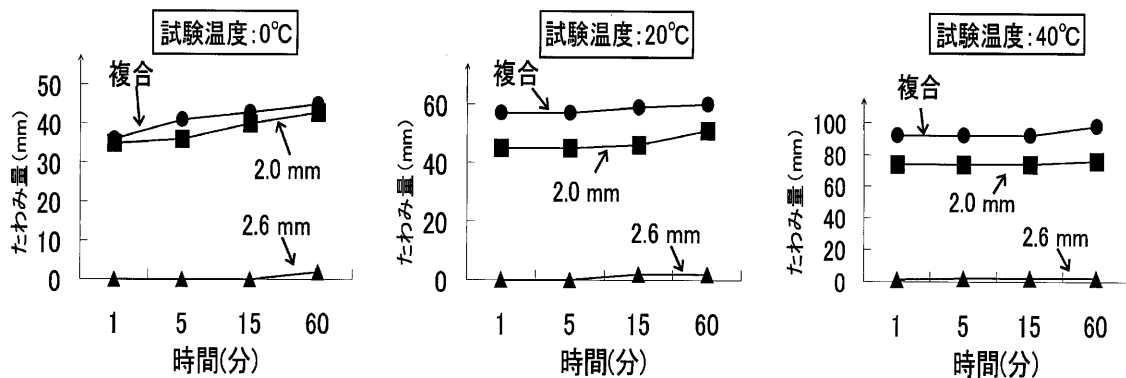


図 11.2.10 VVF ケーブルのたわみ性試験結果

エコキュート（標準機種 1.5 kW、1 日の通電時間 4 hrs）の電源配線（10 m）を、3 心型（2.0mm）から複合型（5.5mm²）にサイズアップした場合と、IH クッキングヒータ（標準機種 4.8 kW、1 日の通電時間 1 hrs）の電源配線（15 m）を、3 心型（2.6mm）から CV-T 3×8[□] にサイズアップした場合について、ケーブル 1 本あたり 1 日の通電ロス低減量 W_{day} (Wh) を次式により求めた。なお、負荷の力率は、エコキュートでは 0.85（誘導電動機）、IH クッキングヒータでは 0.95（電磁コイル）とした。

$$W_{\text{day}} = m' \times I^2 \times (r_1 - r_2) \times 10^{-3} \times H_{\text{day}} \times \ell \quad \dots\dots\dots (11.2.4)$$

m' : 電流が流れる線心数（単相 3 線式の場合、 $m' = 2$ ）

I : 通電電流 (A)

r_1 : サイズアップ前サイズの導体抵抗 (20°C、 Ω/m)

r_2 : サイズアップ後サイズの導体抵抗 (20°C、 Ω/m)

H_{day} : 1 日の通電時間 (hrs)

ℓ : ケーブル長 (m)

数値計算は、エコキュートの場合、 $W_{\text{day}} = 2 \times (1500/200/0.85)^2 \times (5.65 - 3.33) \times 10^{-3} \times 4 \times 10 = 14.4 \text{ Wh}$ 、IH クッキングヒータの場合、 $W_{\text{day}} = 2 \times (4800/200/0.95)^2 \times (3.35 - 2.34) \times 10^{-3} \times 1 \times 15 = 19.3 \text{ Wh}$ となる。両者を合計すると 33.7 Wh となり、1 世帯当たり年間の通電ロス低減量は、 $33.7 \times 10^{-3} \times 365 \div 12 \text{ kWh}$ となる。

2. 5 あとがき

工場・ビルの低圧 CV-T ケーブルについては、通電ロスによるケーブル表面の温度上昇が 10℃程度であることから、表面温度を測定することによりサイズアップの対象ケーブルが容易に特定できる目処がついた。また、サイズアップ前後それぞれのケーブルを用いた実験を行い、ケーブルの通電ロス量(kWh)とケーブル表面温度上昇値を実測した結果、測定値と理論値が一致することが確認できた。

住宅の 200V 用 VVF ケーブルを対象にしたサイズアップには、たわみ性に優れた複合型(5.5mm²)の新規ケーブルを考え、これを用いてエコキュートと IH クッキングヒータの電源配線をサイズアップすると、1 世帯当たり年間 12 kWh 程度の電力量が節約できるという結果が得られた。

以上、ビル・工場の CV-T ケーブル、及び住宅の VVF ケーブルを対象に、サイズアップを進めるにあたっての諸課題に対し、その対応策を示すことができた。

参考文献

- 1) 日本電線工業会規格(JCS 168-1: 2004) : 「33kV 以下電力ケーブルの許容電流計算―第 1 部 : 計算式および定数」、(社)日本電線工業会発行
- 2) 益尾和彦、久米伸一、原 武久 : 「ビル・工場及び住宅の 200V 配線を対象とした電線・ケーブル(CV-T, VVF)の導体サイズアップの検討」、電気設備学会誌、Vol. 29、No. 4、pp. 307～315 (2009)
- 3) 益尾和彦、原達也 : 「オール電化 200V 配線の太サイズ複合型 VVF ケーブルの省エネ性について」、電気と工事、Vol. 49、No. 12、pp. 62～67 (2008)

第3章 経済性 (LCC) と環境性 (LCA) を考慮した

電力ケーブルのサイズ適正化の指針構築

3. 1 まえがき

第1章と第2章で、電力ケーブルの導体サイズを大きくすると、通電ロスが大きく低減できることより、需要家が負担する電力料金が低減でき、同時に CO₂ 排出量の大幅削減に繋がることがわかったが、今後、サイズアップの普及のためには、経済性と環境性 (CO₂ 排出) の双方の観点から、適正なサイズの決定指針を作り、それを国内規格や国際規格 (IEC) にすることが必要となる。

電力ケーブルの許容電流は、ケーブルの導体抵抗と熱的定数および周囲条件により決定され、内線規程¹⁾で定められている。低圧 CV-T ケーブルにおいても、通電により導体に生じるジュール熱で絶縁体がダメージを受けない範囲内 (XLPE 絶縁の場合、90℃以下) で許容電流が規定されており、これに基づき、導体サイズが決定されることになる。一方、許容電流に対して、IEC 規格²⁾では、初期投資コスト (ケーブル製造コストと布設工事コスト) に通電使用時コスト (通電ロス分の電力料金) を加えたライフサイクルコスト (LCC) の観点から、それがミニマムとなる導体サイズ決定の指針を示している。

本章では、IEC 規格の LCC の考え方をベースにして、新たにライフサイクルアセスメント (LCA) に基づくケーブルの一生涯における CO₂ 排出量の考え方を取り入れ、それをコスト換算して加算する。その結果得られる LCC と LCA の合算値を新たな定義のライフサイクルコストとし、それがミニマムとなる最適電流値を算出するという、新しい導体サイズ決定指針について検討を行う。また、負荷電流パターンの実態を工場や事務所ビルなど 8 つの分野ごとに調査し、それを電流パターン (等価負荷率と年間稼働日数) に応じ 3 つのケースに区分し、各ケース別に最適電流値を求めることで、指針のさらなる明確化を図る。

3. 2 イニシャルコスト

3. 2. 1 初期投資コスト

IEC 規格では、ケーブル製造コストに布設工事コストを加算した合算コストを初期投資コスト IC_{LCC} としており、 IC_{LCC} (千円/km) は次式で表される。なお、そのコスト内訳については、製造コストは、銅原料費、銅以外 (XLPE、PVC など)

の材料費、加工費（動力費、人件費など）であり、布設工事コストは、補助資材費、労務費ほかである。

$$IC_{LCC} = W \times CU \times 10^{-3} \times K_1 \times K_2 \dots\dots\dots (II. 3. 1)$$

W：ケーブル単位長さ当たりの銅重量（kg/km）

CU：銅建値価格（¥/kg）

K₁：ケーブル製造コスト係数（銅価格に対するコスト増倍率）

K₂：ケーブル布設工事コスト係数（製造コストに対するコスト増倍率）

銅建値価格 CU については、いわゆる‘相場価格’で決まるため、過去数 10 年間の価格変遷をもとに、将来にわたり予想される価格の高い側の値を採用して 750 ¥/kg とした。また、ケーブル単位長さ当たりの銅重量 W は、日本電線工業会の内部資料³⁾の値を採用し、製造コスト係数 K₁ と布設工事コスト係数 K₂ は、「建設物価」⁴⁾の値を採用し決定した。

式(II. 3. 1)に基づき、代表サイズの 38[□] を中心に、その前後のそれぞれ 2 サイズを加えた計 5 サイズ（14[□]～100[□]、以下代表 5 サイズと言う）に対して IC_{LCC} を算出した。結果を 表 II. 3. 1 に示す。

表 II. 3. 1 製造コストと布設工事コストの合算値 IC_{LCC}

| サイズ | W×CU×10 ⁻³ (千¥/km) | K ₁ | K ₂ | IC _{LCC} (千¥/km) |
|---------------------|----------------------------------|----------------|----------------|------------------------------|
| 3× 14 [□] | 291 | 1. 7 | 2 | 989 |
| 3× 22 [□] | 458 | 1. 6 | 2 | 1, 466 |
| 3× 38 [□] | 791 | 1. 5 | 2 | 2, 373 |
| 3× 60 [□] | 1, 249 | 1. 5 | 2 | 3, 747 |
| 3× 100 [□] | 2, 081 | 1. 5 | 2 | 6, 243 |

3. 2. 2 製造時と撤去廃棄時の CO₂ 排出量

CV-T ケーブルを対象に LCA 分析を行った。具体的には、各投入素材ごとに CO₂ 排出量を求め、それらを合計してケーブル単位長さ当たりの CO₂ 排出量 Z' (CO₂-kg/km) を次式により求める。

$$Z' = \Sigma \{ (\text{素材のケーブル単位長さ当り投入量}) \times (\text{素材の単位量当り CO}_2\text{ 排出量}) \} \dots\dots\dots (II. 3. 2)$$

代表 5 サイズの Z' の算出結果を 表 II. 3. 2 に示す。なお、各素材の単位量当り CO_2 排出量については、(社) 電線総合技術センター (JECTEC) のインベントリデータ調査結果⁵⁾ を採用した。

表 II. 3. 2 製造時と撤去廃棄時の CO_2 排出量 Z'

| サイズ | 投入素材 | | 投入量 1km当り | CO_2 排出量 ($\text{CO}_2\text{-kg}$) | |
|------------------------|-------------|-----|---------------|---|--------|
| | 素材名 | 単位 | | 単位量当り | 1km当り |
| $3 \times 14 \square$ | 銅 | kg | 427 | 2.383 | 1,018 |
| | 架橋ポリエチレン | kg | 53 | 1.498 | 79 |
| | ビニル | kg | 112 | 1.711 | 192 |
| | DOP可塑剤 | kg | 56 | 1.826 | 102 |
| | ケーブル製造時使用電力 | kWh | 550 | 0.425 | 234 |
| | 撤去・運搬・廃棄時 | kg | 590(ケーブル重量) | 0.070 | 41 |
| (合計) | | | | | 1,666 |
| $3 \times 22 \square$ | 銅 | kg | 672 | 2.383 | 1,601 |
| | 架橋ポリエチレン | kg | 79 | 1.498 | 118 |
| | ビニル | kg | 133 | 1.711 | 228 |
| | DOP可塑剤 | kg | 67 | 1.826 | 122 |
| | ケーブル製造時使用電力 | kWh | 870 | 0.425 | 370 |
| | 撤去・運搬・廃棄時 | kg | 860(ケーブル重量) | 0.070 | 60 |
| (合計) | | | | | 2,499 |
| $3 \times 38 \square$ | 銅 | kg | 1,159 | 2.383 | 2,762 |
| | 架橋ポリエチレン | kg | 103 | 1.498 | 154 |
| | ビニル | kg | 159 | 1.711 | 272 |
| | DOP可塑剤 | kg | 80 | 1.826 | 146 |
| | ケーブル製造時使用電力 | kWh | 1,490 | 0.425 | 633 |
| | 撤去・運搬・廃棄時 | kg | 1,360(ケーブル重量) | 0.070 | 95 |
| (合計) | | | | | 4,062 |
| $3 \times 60 \square$ | 銅 | kg | 1,832 | 2.383 | 4,366 |
| | 架橋ポリエチレン | kg | 163 | 1.498 | 244 |
| | ビニル | kg | 197 | 1.711 | 337 |
| | DOP可塑剤 | kg | 98 | 1.826 | 179 |
| | ケーブル製造時使用電力 | kWh | 2,360 | 0.425 | 1,003 |
| | 撤去・運搬・廃棄時 | kg | 2,080(ケーブル重量) | 0.070 | 146 |
| (合計) | | | | | 6,275 |
| $3 \times 100 \square$ | 銅 | kg | 3,053 | 2.383 | 7,275 |
| | 架橋ポリエチレン | kg | 279 | 1.498 | 418 |
| | ビニル | kg | 249 | 1.711 | 426 |
| | DOP可塑剤 | kg | 124 | 1.826 | 226 |
| | ケーブル製造時使用電力 | kWh | 3,900 | 0.425 | 1,658 |
| | 撤去・運搬・廃棄時 | kg | 3,370(ケーブル重量) | 0.070 | 236 |
| (合計) | | | | | 10,239 |

次に、 CO_2 排出量 Z' のコスト換算値 IC_{LCA} (千円/km) を、次式により求めた。

$$\text{IC}_{\text{LCA}} = Z' \times M \times 10^{-3} = Z' \times 4 \times 10^{-3} \quad \dots\dots\dots (\text{II. 3. 3})$$

M : CO_2 排出量のコスト換算係数 (円/ $\text{CO}_2\text{-kg}$)

ここで、換算係数 M については、現在の排出権取引価格 (欧州相場) の 3~4 円/ $\text{CO}_2\text{-kg}$ をもとに、その高い側の値を採用して 4 円/ $\text{CO}_2\text{-kg}$ とした。

3. 2. 3 イニシャルコスト

初期投資コスト IC_{LCC} に、製造時と撤去廃棄時の CO_2 排出量(コスト換算値) IC_{LCA} を加えた合算値を、新たな定義のイニシャルコスト IC とする。 IC (千¥/km) は次式で表される。

$$IC = IC_{LCC} + IC_{LCA} \dots\dots\dots (II. 3. 4)$$

式(II. 3. 1) と 式(II. 3. 3) を 式(II. 3. 4) に代入して、代表5サイズごとに IC を算出した。結果を 表II. 3. 3 に示す。

表II. 3. 3 イニシャルコスト IC

| サイズ | IC (千¥/km) |
|------------------------|-------------------------------------|
| $3 \times 14 \square$ | $989 + (1.666 \times 4) = 996$ |
| $3 \times 22 \square$ | $1,466 + (2.499 \times 4) = 1,476$ |
| $3 \times 38 \square$ | $2,373 + (4.062 \times 4) = 2,389$ |
| $3 \times 60 \square$ | $3,747 + (6.275 \times 4) = 3,772$ |
| $3 \times 100 \square$ | $6,243 + (10.239 \times 4) = 6,281$ |

3. 3 ランニングコスト

3. 3. 1 通電使用時コスト

IEC 規格では、ケーブルの総通電期間中における通電ロス分の電力料金を通電使用時コスト RC_{LCC} としており、 RC_{LCC} (千¥/km) は次式で表される。

$$\begin{aligned} RC_{LCC} &= m \times (I_{100\%})^2 \times r \times 10^{-3} \times T \times N \times P \times 10^{-3} \\ &= 3 \times (I_{100\%})^2 \times r \times 10^{-3} \times T \times 30 \times 15 \times 10^{-3} \\ &= 1.35 \times (I_{100\%})^2 \times r \times T \times 10^{-3} \dots\dots\dots (II. 3. 5) \end{aligned}$$

m : ケーブルの線心数 (三相3線式の場合、 $m=3$)

$I_{100\%}$: 最大負荷電流 (A)

r : 通電時における導体抵抗値 (Ω /km)

T : 最大負荷電流の等価年間通電時間数 (hrs)

N : 使用寿命 (年)

P : 電力料金 (¥/kWh)

最大負荷電流 $I_{100\%}$ とは、100%負荷時にケーブルに流れる電流値のことであり、IEC 規格では、 $I_{100\%}$ の等価年間通電時間数 T (hrs/年) を次式で規定している。なお、式中の数字 8760 は年間総時間数 ($365 \times 24 = 8760$ hrs) である。

$$T = \int_0^{8760} \frac{I^2(t) \cdot dt}{(I_{100\%})^2} = x^2 \times 24 \times y \quad \dots\dots\dots (\text{II. 3. 6})$$

$\left\{ \begin{array}{l} x : 1 \text{ 日の等価負荷率} \\ y : \text{年間の稼働日数} \end{array} \right.$

x と y については IEC 規格では規定していないので、適切に決定する必要がある。 x については、ビル・工場における 1 日 (24hrs) の標準的負荷パターンは、図 II. 3. 1 に示す配電用変圧器の負荷パターン実態調査結果⁶⁾ がケーブルの場合にも適用できるので、図 II. 3. 1 の下段に示す 1 日 (24hrs) の等価負荷率算出値をもとに $x=0.50$ とした。 y については、これ以下にはならない少ない側の日数として $y=200$ 日 とした。

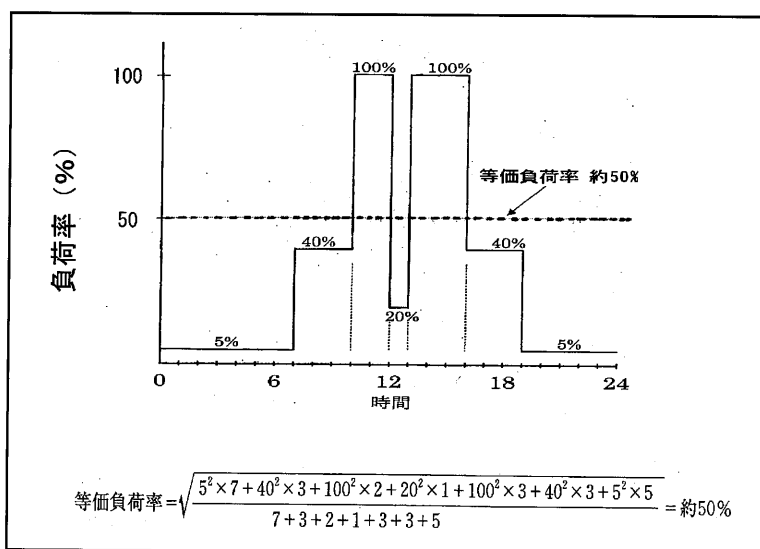


図 II. 3. 1 ビル・工場における 1 日の負荷パターン⁶⁾

通電による導体温度上昇値 $\Delta \theta$ については、等価負荷率 x が 0.50 より、最大許容温度上昇値に $(0.50)^2 = 0.25$ を乗じた値だけ上昇し、上昇値 $\Delta \theta$ (°C) は次式となる。

$$\Delta \theta = (\theta_m - \theta_0) \times x^2 = (70 - 20) \times 0.25 = 12.5 \quad \dots\dots\dots (\text{II. 3. 7})$$

θ_0 : 平均周囲温度 (°C) 日本の場合、 $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$

θ_m : 最大定格導体動作温度 (°C)

…… XLPE の場合、JCS 規格より、最大許容温度上昇値は $90-40=50^{\circ}\text{C}$ であり、平均周囲温度 θ_0 の 20°C に 50°C を加え、 $\theta_m=70^{\circ}\text{C}$ となる。

これより、通電時における導体抵抗値 r (Ω/km) は次式となる。

$$r = r_{20} \times h = r_{20} \times 1.049 \dots\dots\dots (\text{II. 3. 8})$$

r_{20} : 20°C における導体抵抗値 (Ω/km)

h : 通電時の導体温度における導体抵抗と 20°C における導体抵抗の比で、 $h=1+(0.00393 \times \Delta\theta)$ で表され、 $\Delta\theta=12.5^{\circ}\text{C}$ の場合は $h=1.049$ となる。

式 (II. 3. 8) に基づき、各サイズごとに r を算出した。結果を表 II. 3. 4 に示す。

表 II. 3. 4 通電時における導体抵抗値 r

| サイズ | r (Ω/km) |
|--------------------------|------------------------------|
| $3 \times 14^{\square}$ | $1.34 \times 1.049 = 1.41$ |
| $3 \times 22^{\square}$ | $0.849 \times 1.049 = 0.891$ |
| $3 \times 38^{\square}$ | $0.491 \times 1.049 = 0.515$ |
| $3 \times 60^{\square}$ | $0.311 \times 1.049 = 0.326$ |
| $3 \times 100^{\square}$ | $0.187 \times 1.049 = 0.196$ |

使用寿命 N については、IEC 規格では 30 年と規定しており、日本の場合でも法定耐用年数 (償却年数) は建物で 26 年、付属電気設備 (ケーブルなど) は 15 年となっていることより、ケーブルの場合は実質的には建物に付随して使われ続けることを総合的に考えて、 $N=30$ 年は妥当と考えた。

電力料金 P については、IEC 規格では、将来の経済状況の変化を加味して決定するよう推奨しているが、日本は既に右肩上がりから成熟した経済へ移行していることから、現状の電力料金 (業務用) $12 \sim 15$ 円/kWh をもとに、その高い側の値を採用して $P=15$ 円/kWh とし、これは将来にわたり変わらないと考えた。

3. 3. 2 通電使用時 CO_2 排出量

ケーブル総通電期間中における通電ロス分の CO_2 排出量 Z'' ($\text{CO}_2\text{-kg/km}$) は次式となる。

$$\begin{aligned}
Z'' &= m \times (I_{100\%})^2 \times r \times 10^{-3} \times T \times N \times K \\
&= 3 \times (I_{100\%})^2 \times r \times 10^{-3} \times T \times 30 \times 0.425 \\
&= 38.25 \times (I_{100\%})^2 \times r \times T \times 10^{-3} \dots\dots\dots (II. 3. 9)
\end{aligned}$$

K: 単位電力量発電時の CO₂ 排出量 (CO₂-kg/kWh)

ここで、発電時の CO₂ 排出量 K は、電気事業連合会公表値⁸⁾に基づき、0.425 CO₂-kg/kWh とした。

式(II. 3. 9) の Z'' のコスト換算値 RC_{LCA} (千円/km) は、前述の換算係数 M=4 円/CO₂-kg を採用して、次式となる。

$$\begin{aligned}
RC_{LCA} &= Z'' \times M \times 10^{-3} = Z'' \times 4 \times 10^{-3} \\
&= 0.153 \times (I_{100\%})^2 \times r \times T \times 10^{-3} \dots\dots\dots (II. 3. 10)
\end{aligned}$$

3. 3. 3 ランニングコスト

通電使用時コスト RC_{LCC} に 通電使用時 CO₂ 排出量(コスト換算値) RC_{LCA} を加えた合算値を、新たな定義のランニングコスト RC とする。RC (千円/km) は次式で表される。

$$RC = RC_{LCC} + RC_{LCA} \dots\dots\dots (II. 3. 11)$$

式(II. 3. 5) と 式(II. 3. 10) を 式(II. 3. 11) に代入すると、RC (千円/km) は次式となる。

$$RC = F(x^2, y) \times (I_{100\%})^2 \times r \times 10^{-3} \dots\dots\dots (II. 3. 12)$$

ここで、F(x², y) (円/W) は、ランニングコスト RC を構成する全ての定数を一括まとめたもので、単位通電ロス(W) あたりのランニングコストを表すが、式(II. 3. 6) で $T = x^2 \times 24 \times y$ より、次式の通り x² と y の関数になる。

$$\begin{aligned}
F(x^2, y) &= (1.35 + 0.153) \times T \\
&= 1.50 \times (x^2 \times 24 \times y) = 36 x^2 y \dots\dots\dots (II. 3. 13)
\end{aligned}$$

これより、前述の x=0.50 と y=200 を代入すると、F(x², y)=36×(0.50)²×200=1800 円/W となる。

3. 4 ライフサイクルコストとそれがミニマムとなる最適電流値

イニシャルコスト IC とランニングコスト RC を加えた合算コストを、新たな定義のライフサイクルコスト LC (千円/km) とする。

$$LC = IC + RC \dots\dots\dots (II. 3. 14)$$

式 (II. 3. 14) に 式 (II. 3. 12) を代入すると、LC (千円/km) は次式となる。

$$LC = IC + \{F(x^2, y) \times (I_{100\%})^2 \times r \times 10^{-3}\} \dots\dots\dots (II. 3. 15)$$

式 (II. 3. 15) より、ライフサイクルコスト LC を縦軸に、電流 $I_{100\%}$ を横軸にとると、両者の関係は 図 II. 3. 2 のグラフで表される。グラフは、当該サイズとして 38[□]の場合を例に、下のサイズ (22[□]) と上のサイズ (60[□]) とともに、最大負荷電流 $I_{100\%}$ をゼロから増大させた時のライフサイクルコスト (LC) の変化を示したものである。 $I_{100\%}$ がゼロの時は、ランニングコスト (RC) もゼロのため、LC はイニシャルコスト (IC) の値そのものを示す。RC は $I_{100\%}$ の二乗で増大するため、LC は $I_{100\%}$ の増大とともに放物線を描き増大し、その傾きはサイズが大きいくほど緩やかになる。サイズごとの曲線同士の交点位置から、当該サイズ (38[□]) のコストミニマムとなる $I_{100\%}$ の範囲 $I_{\min} \sim I_{\max}$ が決定される。この例の場合、下のサイズ (22[□]) との交点 I_{\min} と、上のサイズ (60[□]) との交点 I_{\max} との間が、38[□] のコストミニマムの範囲となる。

次に、最適電流値 $I_{\min} \sim I_{\max}$ の値を求める。以後の説明のため、当該サイズに対し、下のサイズと上のサイズそれぞれのイニシャルコスト IC と導体抵抗 r を次のように定義する。

IC : 当該サイズのイニシャルコスト (千円/km)

IC₋₁ : 下のサイズのイニシャルコスト (千円/km)

IC₊₁ : 上のサイズのイニシャルコスト (千円/km)

r : 当該サイズの通電時における導体抵抗値 (Ω/km)

r₋₁ : 下のサイズの通電時における導体抵抗値 (Ω/km)

r₊₁ : 上のサイズの通電時における導体抵抗値 (Ω/km)

図 II. 3. 2 より、当該サイズと下のサイズとの交点では、両者のライフサイクルコスト (LC) が同じとなることから、次式が成り立つ。

$$\begin{aligned}
 & IC + \{F(x^2, y) \times (I_{\min})^2 \times r \times 10^{-3}\} \\
 & = IC_{-1} + \{F(x^2, y) \times (I_{\min})^2 \times r_{-1} \times 10^{-3}\} \quad \dots\dots (II. 3. 16)
 \end{aligned}$$

式(II. 3. 16) を変形すると、 I_{\min} (A) は次式となる。

$$I_{\min} = \sqrt{\frac{IC - IC_{-1}}{F(x^2, y) \times (r_{-1} - r) \times 10^{-3}}} \quad \dots\dots (II. 3. 17)$$

同様に、当該サイズと上のサイズとの交点では、両者のライフサイクルコスト(LC) が同じとなることから、次式が成り立つ。

$$\begin{aligned}
 & IC + \{F(x^2, y) \times (I_{\max})^2 \times r \times 10^{-3}\} \\
 & = IC_{+1} + \{F(x^2, y) \times (I_{\max})^2 \times r_{+1} \times 10^{-3}\} \quad \dots\dots (II. 3. 18)
 \end{aligned}$$

式(II. 3. 18) を変形すると、 I_{\max} (A) は次式となる。

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{IC_{+1} - IC}{F(x^2, y) \times (r - r_{+1}) \times 10^{-3}}} \quad \dots\dots (II. 3. 19)$$

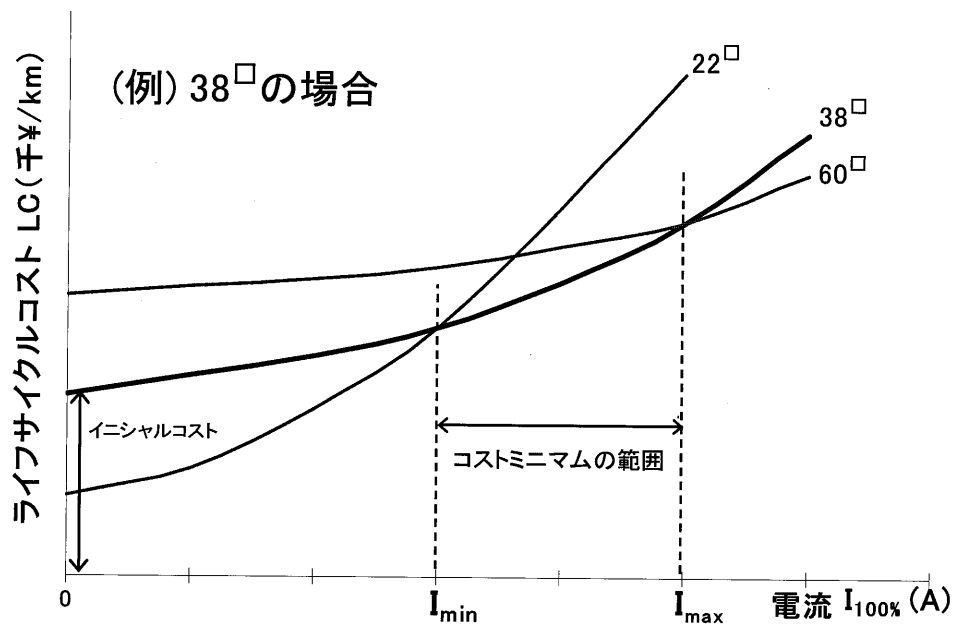


図 II. 3. 2 ライフサイクルコストミニマムの最適電流値

この I_{\max} を、従来の「許容電流」に対応して「環境配慮電流」と呼ぶこととし、全てのサイズ (8 \square ~325 \square 、以下、全 10 サイズと言う) に対する I_{\max} を計算した。結果を 表 II. 3. 5 に示す。

表 II. 3. 5 環境配慮電流表 (その 1)

| サイズ | I_{\max} (A) |
|--------------------------|---|
| 3 \times 8 \square | $\sqrt{\frac{996 - 594}{1800 \times (2.45 - 1.41) \times 10^{-3}}} = 15$ |
| 3 \times 14 \square | $\sqrt{\frac{1476 - 996}{1800 \times (1.41 - 0.891) \times 10^{-3}}} = 23$ |
| 3 \times 22 \square | $\sqrt{\frac{2389 - 1476}{1800 \times (0.891 - 0.515) \times 10^{-3}}} = 37$ |
| 3 \times 38 \square | $\sqrt{\frac{3772 - 2389}{1800 \times (0.515 - 0.326) \times 10^{-3}}} = 64$ |
| 3 \times 60 \square | $\sqrt{\frac{6281 - 3772}{1800 \times (0.326 - 0.196) \times 10^{-3}}} = 104$ |
| 3 \times 100 \square | $\sqrt{\frac{9420 - 6281}{1800 \times (0.196 - 0.130) \times 10^{-3}}} = 163$ |
| 3 \times 150 \square | $\sqrt{\frac{11740 - 9420}{1800 \times (0.130 - 0.0979) \times 10^{-3}}} = 200$ |
| 3 \times 200 \square | $\sqrt{\frac{14810 - 11740}{1800 \times (0.0979 - 0.0791) \times 10^{-3}}} = 301$ |
| 3 \times 250 \square | $\sqrt{\frac{19249 - 14810}{1800 \times (0.0791 - 0.0607) \times 10^{-3}}} = 366$ |
| 3 \times 325 \square | $\sqrt{\frac{23472 - 19249}{1800 \times (0.0607 - 0.0490) \times 10^{-3}}} = 448$ |

得られた環境配慮電流値を、サイズごとに、従来の許容電流値とともに 2 本の棒グラフに表し、かつ、両者の比率 (環境配慮電流/許容電流) を折れ線グラフで表した。(図 II. 3. 3 参照) これより、サイズが大きくなると比率も大きくなる、いわゆる‘傾斜式’になることがわかった。傾斜式になった理由は、環境配慮電流値が、導体サイズ (断面積) にほぼ比例して大きくなるのに対し、許容電流値は、熱放散がケーブル外径 (≒導体外径) に比例するため、導体断面積の平方根にほぼ比例して大きくなるからである。

ここで重要なのは、この傾斜式という結果がサイズアップを実施に移すにあたり極めて好都合なことである。つまり、細いケーブルではアップ倍率が大きく、太いケーブルでは小さくなるため、特に太いケーブルのように布設スペースに余裕のない場合でも布設上の問題はなくなる。

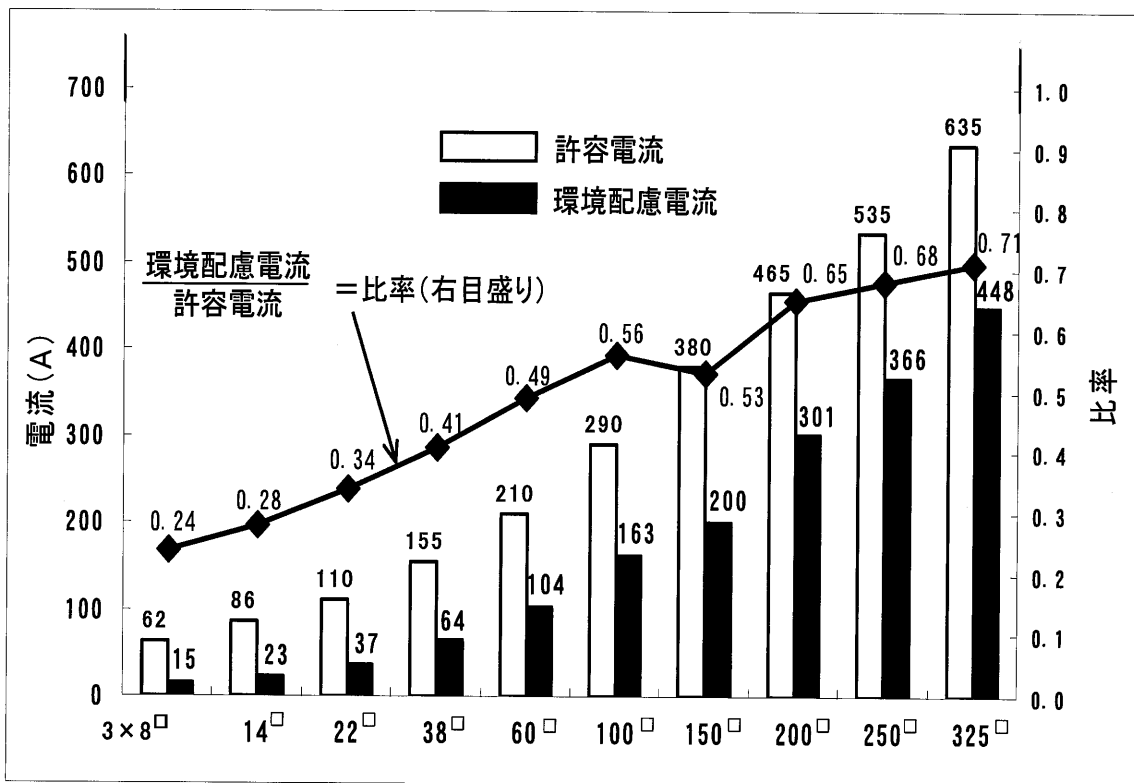


図 II. 3. 3 環境配慮電流と許容電流の比率

3. 5 サイズアップ倍率と環境効率

3. 5. 1 サイズアップ

第 1 章で述べた通り、電気工事の設計段階におけるサイズ決定は、当該ケーブルの最大負荷電流 $I_{100\%}$ (当該ケーブルのすべての負荷の定格電流を総和したもの) を初めに算出し、許容電流表をもとに、例えば、22[□]の許容電流 (110A) と 38[□]の許容電流 (155A) の間にあれば、上のサイズの 38[□]とするというやり方で行われる。従って、確率的には、38[□]の最大負荷電流 $I_{100\%}$ は、38[□] と 22[□] の許容電流値を平均した $(155+110)/2 = 133 \text{ A}$ となるので、ここでは理論上、平均値の 133A を 38[□]の最大負荷電流値 $I_{100\%}$ とするので、 $I_{100\%}$ が求まれば、表 II. 3. 5 より最適なサイズが決まる。例えば、38[□]の場合、 $I_{100\%}$ は 133 A であり、それが 103 A (60[□]) と 163 A (100[□]) の間にあることから、100[□] が最適サイズとなる。この場合の導体断面積増大倍率は $(100^{\square} / 38^{\square}) = 2.6$ 倍 となる。

同様にして得られた全 10 サイズの最適サイズと増大倍率を 表 II. 3. 6 に示す。

この表より、増大倍率は細いケーブルでは大きく、太いケーブルでは小さいという、前節で指摘した事実が確認できる。

表Ⅱ. 3. 6 最大負荷電流値とサイズアップ(倍率)

| | 最大負荷電流値 $I_{100\%}$ (A) | サイズアップ (導体断面積アップ倍率) |
|------------------------|----------------------------|---|
| $3 \times 8 \square$ | $(62+46)/2$ $=54$ | $\rightarrow 3 \times 38 \square$ (4. 8倍) |
| $3 \times 14 \square$ | $(86+62)/2$ $=74$ | $\rightarrow 3 \times 60 \square$ (4. 3倍) |
| $3 \times 22 \square$ | $(110+86)/2$ $=98$ | $\rightarrow 3 \times 60 \square$ (2. 7倍) |
| $3 \times 38 \square$ | $(155+110)/2$ $=133$ | $\rightarrow 3 \times 100 \square$ (2. 6倍) |
| $3 \times 60 \square$ | $(210+155)/2$ $=183$ | $\rightarrow 3 \times 150 \square$ (2. 5倍) |
| $3 \times 100 \square$ | $(290+210)/2$ $=250$ | $\rightarrow 3 \times 200 \square$ (2. 0倍) |
| $3 \times 150 \square$ | $(380+290)/2$ $=335$ | $\rightarrow 3 \times 250 \square$ (1. 7倍) |
| $3 \times 200 \square$ | $(465+380)/2$ $=423$ | $\rightarrow 3 \times 325 \square$ (1. 6倍) |
| $3 \times 250 \square$ | $(535+465)/2$ $=500$ | $\rightarrow 3 \times 200 \square$ (1. 6倍) ダブル |
| $3 \times 325 \square$ | $(635+535)/2$ $=585$ | $\rightarrow 3 \times 200 \square$ (1. 2倍) ダブル |

3. 5. 2 環境効率とファクター

ローマクラブが「ファクター4」^{9), 10)} という新しいスローガンを提唱した。「ファクター4」とは、「豊かさを2倍に、環境負荷を半分に」という概念であり、我が国においても、電気機器などの省エネ・環境負荷特性を示す指標の一つとして、「環境効率」と「ファクター」が最近急速に採用され始めている。「環境効率」は次式で表される。

$$\text{環境効率} = \frac{\text{製品のライフサイクルでの価値}}{\text{製品のライフサイクルでの環境影響}} \quad \dots\dots (\text{Ⅱ. 3. 20})$$

分子の「製品の価値」が大きいほど、また分母の「製品の環境影響」が小さいほど環境効率は高くなる。ライフサイクルコスト(LCC)の逆数が「製品の価値」となる。

また、ファクターは次式で表される。

$$\text{ファクター} = \frac{\text{評価製品の環境効率}}{\text{基準製品の環境効率}} = \frac{\left(\frac{\text{サイズアップ前のLCC}}{\text{サイズアップ後のLCC}} \right)}{\left(\frac{\text{サイズアップ後のLCA}}{\text{サイズアップ前のLCA}} \right)} \dots\dots (II. 3. 21)$$

サイズアップ前を「基準製品」、サイズアップ後を「評価製品」で考えることができ、式(II. 3. 21) より、表II. 3. 6 のようにサイズアップした時のファクターを求める。具体的には、分子の LCC については、式(II. 3. 15) から LC を求め、分母の LCA については、式(II. 3. 2) から求まる Z' に 式(II. 3. 9) から求まる Z'' を加算し求めた。結果を 表II. 3. 7 に示す。

表より、全 10 サイズのファクターは、11.9～1.3 で高いレベルにあり、かつ、その平均値は 4.1 で「ファクター4」達成レベルにあることがわかる。(代表 5 サイズの平均値は 4.5 である。)

表II. 3. 7 ファクターの計算結果

| サイズアップ | ファクター |
|---|---|
| 3× 8 [□] →3× 38 [□] | $\frac{\{594+(1800 \times 54^2 \times 2.45 \times 10^{-3})\} / \{2389+(1800 \times 54^2 \times 0.515 \times 10^{-3})\}}{\{4062+(45900 \times 54^2 \times 0.515 \times 10^{-3})\} / \{(1082+(45900 \times 54^2 \times 2.45 \times 10^{-3})\}} = 11.9$ |
| 3× 14 [□] →3× 60 [□] | $\frac{\{996+(1800 \times 74^2 \times 1.41 \times 10^{-3})\} / \{3772+(1800 \times 74^2 \times 0.326 \times 10^{-3})\}}{\{6275+(45900 \times 74^2 \times 0.326 \times 10^{-3})\} / \{(1666+(45900 \times 74^2 \times 1.41 \times 10^{-3})\}} = 8.6$ |
| 3× 22 [□] →3× 60 [□] | $\frac{\{1476+(1800 \times 98^2 \times 0.891 \times 10^{-3})\} / \{3372+(1800 \times 98^2 \times 0.326 \times 10^{-3})\}}{\{6275+(45900 \times 98^2 \times 0.326 \times 10^{-3})\} / \{2499+(45900 \times 98^2 \times 0.891 \times 10^{-3})\}} = 4.7$ |
| 3× 38 [□] →3×100 [□] | $\frac{\{2389+(1800 \times 133^2 \times 0.515 \times 10^{-3})\} / \{6281+(1800 \times 133^2 \times 0.196 \times 10^{-3})\}}{\{10239+(45900 \times 133^2 \times 0.196 \times 10^{-3})\} / \{4062+(45900 \times 133^2 \times 0.515 \times 10^{-3})\}} = 3.7$ |
| 3× 60 [□] →3×150 [□] | $\frac{\{3772+(1800 \times 183^2 \times 0.326 \times 10^{-3})\} / \{9430+(1800 \times 183^2 \times 0.130 \times 10^{-3})\}}{\{15005+(45900 \times 183^2 \times 0.130 \times 10^{-3})\} / \{6275+(45900 \times 183^2 \times 0.326 \times 10^{-3})\}} = 3.2$ |
| 3×100 [□] →3×200 [□] | $\frac{\{6281+(1800 \times 250^2 \times 0.196 \times 10^{-3})\} / \{11740+(1800 \times 250^2 \times 0.0979 \times 10^{-3})\}}{\{20073+(45900 \times 250^2 \times 0.0979 \times 10^{-3})\} / \{10239+(45900 \times 250^2 \times 0.196 \times 10^{-3})\}} = 2.4$ |
| 3×150 [□] →3×250 [□] | $\frac{\{9420+(1800 \times 335^2 \times 0.130 \times 10^{-3})\} / \{14810+(1800 \times 335^2 \times 0.0791 \times 10^{-3})\}}{\{25046+(45900 \times 335^2 \times 0.0791 \times 10^{-3})\} / \{15005+(45900 \times 335^2 \times 0.130 \times 10^{-3})\}} = 1.8$ |
| 3×200 [□] →3×325 [□] | $\frac{\{11740+(1800 \times 423^2 \times 0.0979 \times 10^{-3})\} / \{19249+(1800 \times 423^2 \times 0.0607 \times 10^{-3})\}}{\{32274+(45900 \times 423^2 \times 0.0607 \times 10^{-3})\} / \{20073+(45900 \times 423^2 \times 0.0979 \times 10^{-3})\}} = 1.7$ |
| 3×250 [□] →3×200 [□] (ダブル) | $\frac{\{14810+(1800 \times 500^2 \times 0.0791 \times 10^{-3})\} / \{22480+(1800 \times 500^2 \times 0.0490 \times 10^{-3})\}}{\{40146+(45900 \times 500^2 \times 0.0490 \times 10^{-3})\} / \{25046+(45900 \times 500^2 \times 0.0791 \times 10^{-3})\}} = 1.7$ |
| 3×325 [□] →3×200 [□] (ダブル) | $\frac{\{19249+(1800 \times 585^2 \times 0.0607 \times 10^{-3})\} / \{23480+(1800 \times 585^2 \times 0.0490 \times 10^{-3})\}}{\{40146+(45900 \times 585^2 \times 0.0490 \times 10^{-3})\} / \{32274+(45900 \times 585^2 \times 0.0607 \times 10^{-3})\}} = 1.3$ |
| (平均) 4.1 | |

3. 6 負荷電流パターンごとの環境配慮電流値の算出

3. 6. 1 負荷電流パターンの実態調査

式(Ⅱ. 3. 19) より、環境配慮電流はその分母にある $F(x^2, y)$ 、即ち、 x (等価負荷率) と y (年間稼働日数) に大きく依存する。

x と y を求めるため、①一般工場 ($n=20$)、②プラント工場 ($n=5$)、③事務所ビル ($n=15$)、④スーパー・百貨店 ($n=5$)、⑤病院 ($n=2$)、⑥大学・研究所 ($n=2$)、⑦ホテル・旅館 ($n=2$)、⑧その他公共施設等 ($n=5$) の分野別に、負荷電流パターンの調査を行った。得られた合計 $n=56$ の負荷電流パターンをもとに、最大負荷電流値(ピーク値)を 100% とし、各時刻における電流値のピーク値に対する%比率を求めた。8つの分野ごとの結果を図Ⅱ. 3. 4 に示す。(各図の右上部に、等価負荷率 x 、及び年間稼働日数 y を示した。)

次に、合計 $n=56$ の全てにつき、それぞれの x と y の値をもとに、 $F(x^2, y)$ を式(Ⅱ. 3. 13) に基づき求め、その分布を図Ⅱ. 3. 5 に示した。図より、①～⑧の8つの分野は、 $F(x^2, y)$ の値の大きい順に、以下の3つのケースに明確に区分できることがわかる。

- (1) $F(x^2, y) = 6,750$ 円/W 以上のケース …… ②、⑤
- (2) $F(x^2, y) = 4,750 \sim 6,500$ 円/W のケース …… ①、④
- (3) $F(x^2, y) = 4,500$ 円/W 以下のケース …… ③、⑥、⑦、⑧

工場については、素材産業(装置産業)と言われるプラント工場は、一般工場に比較して負荷電流が大きく、かつ長時間にわたる傾向(昼夜間通電)にあることから、 $F(x^2, y)$ の値で両者の間で明確な差異になったと考えられる。また、⑤病院 と ②プラント工場、また、④スーパー・百貨店 と ①一般工場 が同じ区分になったが、これは、病院とスーパー・百貨店が、ほぼ昼夜間稼働に近く、かつ年間稼働日数が大きいためであると考えられる。

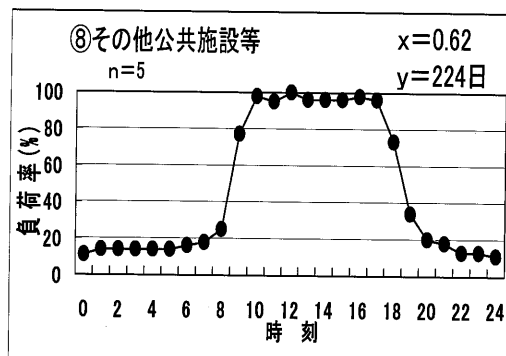
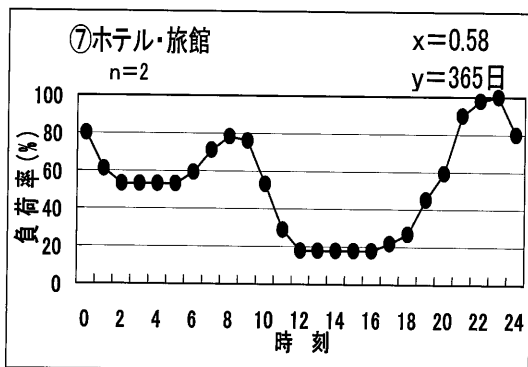
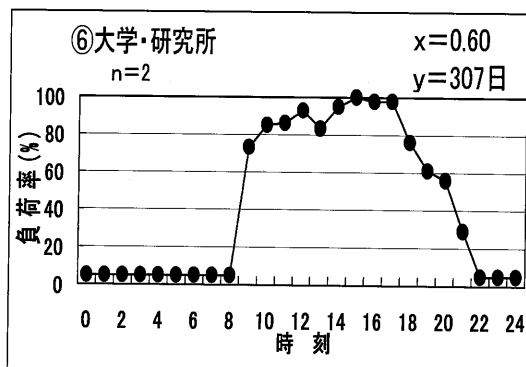
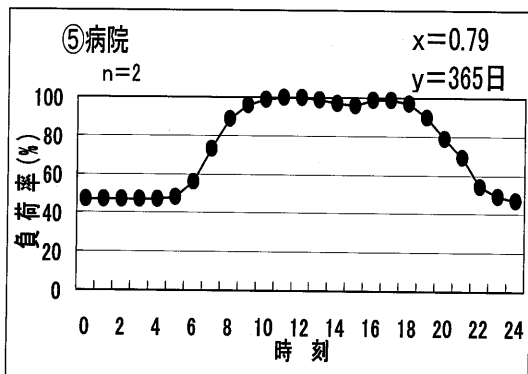
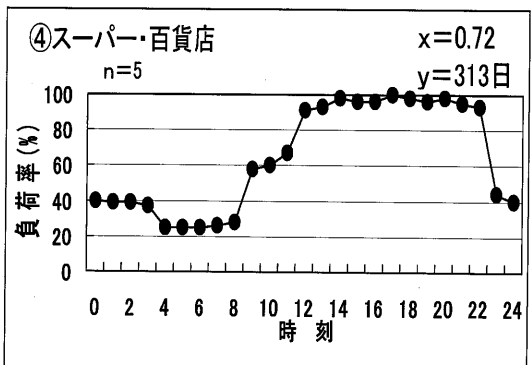
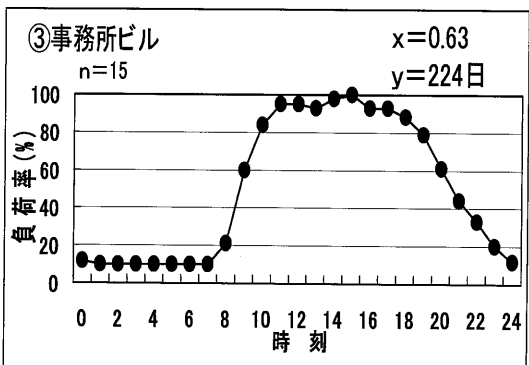
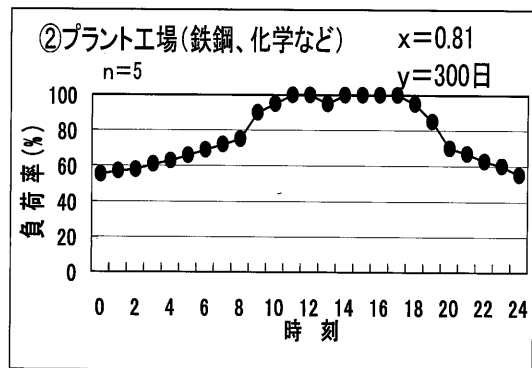
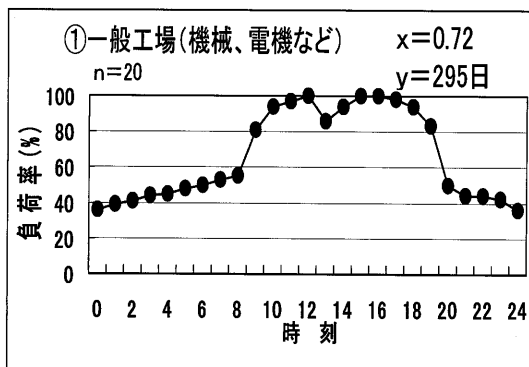


図 II. 3. 4 日負荷曲線 (等価負荷率) と年間稼働日数

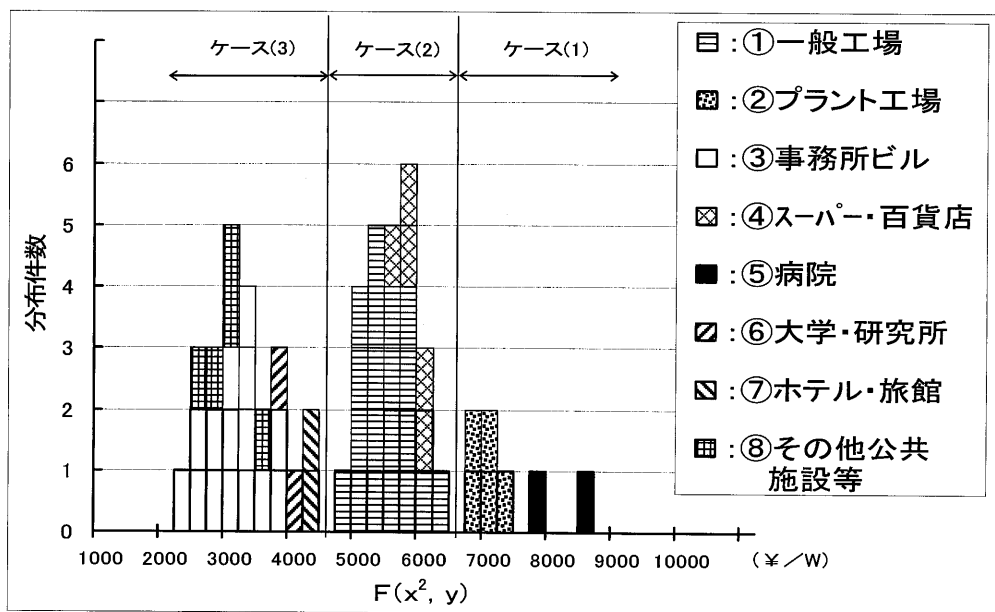


図 11.3.5 $F(x^2, y)$ の値と分布件数

3. 6. 2 ケース別の環境配慮電流

ケース別の環境配慮電流を求めるため、まず、(1)、(2)、(3) のケースごと、 x 、 y の値を、各ケースを代表する分野のデータをもとに、かつ区切の良い数字に丸めて固定する。併せて、関数 $F(x^2, y)$ 、および、関数 h (通電時導体温度における導体抵抗と 20℃における導体抵抗の比) の値を計算する。

(1) プラント工場ほか (②、⑤)

$x \doteq 0.80$ (等価負荷率) $y \doteq 300$ 日

$F(x^2, y) = 36 \times (0.80)^2 \times 300 = 6912 \text{ ¥/W}$

$h = 1 + (0.00393 \times 32) = 1.126$

(等価負荷率 x が 0.80 より、最大許容温度上昇値に $(0.80)^2 = 0.64$ を乗じた値だけ上昇し、上昇値 $\Delta \theta$ は $(70 - 20) \times 0.64 \doteq 32 \text{ }^\circ\text{C}$ となる。)

(2) 一般工場ほか (①、④)

$x \doteq 0.70$ (等価負荷率) $y \doteq 300$ 日

$F(x^2, y) = 36 \times (0.70)^2 \times 300 = 5292 \text{ ¥/W}$

$h = 1 + (0.00393 \times 25) = 1.098$

(等価負荷率 x が 0.70 より、最大許容温度上昇値に $(0.70)^2 = 0.49$ を乗じた値だけ上昇し、上昇値 $\Delta \theta$ は $(70 - 20) \times 0.49 \doteq 25 \text{ }^\circ\text{C}$ となる。)

(3) ビルほか (③、⑥、⑦、⑧)

$x \doteq 0.60$ (等価負荷率) $y \doteq 225$ 日

$F(x^2, y) = 36 \times (0.60)^2 \times 225 = 2916 \text{ 円/W}$

$h = 1 + (0.00393 \times 18) = 1.071$

(等価負荷率 x が 0.60 より、最大許容温度上昇値に $(0.60)^2 = 0.36$ を乗じた値だけ上昇し、上昇値 $\Delta \theta$ は $(70 - 20) \times 0.36 \doteq 18 \text{ }^\circ\text{C}$ となる。)

次に、ケース別の環境配慮電流を、表 II. 3. 5 の環境配慮電流表 (その 1) をもとに、その算出に用いた $F(x^2, y)$ と h の値を、ケースごとの値に置き換えて求める。即ち、環境配慮電流表 (その 1) [$F(x^2, y) = 1800$ 、 $h = 1.049$ が前提] をもとにして、(1) プラント工場ほかのケースでは、 $\sqrt{1800/6912} = 0.510$ と $\sqrt{1.049/1.126} = 0.965$ 、(2) 一般工場ほかのケースでは、 $\sqrt{1800/5292} = 0.583$ と $\sqrt{1.049/1.098} = 0.977$ 、(3) ビルほかのケースでは、 $\sqrt{1800/2916} = 0.786$ と $\sqrt{1.049/1.071} = 0.990$ をそれぞれ乗じることで、3 つのケース別に環境配慮電流値を求めた。結果を表 II. 3. 8 に示す。これにより、負荷電流パターン (等価負荷率、年間稼働日数) に応じ、環境配慮電流表を 3 つのケースに区分することで、それぞれのケースについて導体サイズの最適化が図れ、結果として、日本全体の通電ロス低減幅、および CO_2 排出量の削減幅をコストミニマムで最大にすることが可能となる。

表 II. 3. 8 環境配慮電流表 (その 2)

(単位 : A)

| サイズ | (1)プラント工場ほか | (2)一般工場ほか | (3)ビルほか |
|---------|---|---|---|
| 3× 8□ | $15 \times 0.510 \times 0.965$ =7 | $15 \times 0.583 \times 0.977$ =9 | $15 \times 0.786 \times 0.990$ =12 |
| 3× 14□ | $23 \times 0.510 \times 0.965$ =11 | $23 \times 0.583 \times 0.977$ =13 | $23 \times 0.786 \times 0.990$ =18 |
| 3× 22□ | $37 \times 0.510 \times 0.965$ =18 | $37 \times 0.583 \times 0.977$ =21 | $37 \times 0.786 \times 0.990$ =29 |
| 3× 38□ | $64 \times 0.510 \times 0.965$ =31 | $64 \times 0.583 \times 0.977$ =36 | $64 \times 0.786 \times 0.990$ =50 |
| 3× 60□ | $104 \times 0.510 \times 0.965$ =51 | $104 \times 0.583 \times 0.977$ =59 | $104 \times 0.786 \times 0.990$ =81 |
| 3× 100□ | $163 \times 0.510 \times 0.965$ =80 | $163 \times 0.583 \times 0.977$ =93 | $163 \times 0.786 \times 0.990$ =127 |
| 3× 150□ | $200 \times 0.510 \times 0.965$ =98 | $200 \times 0.583 \times 0.977$ =114 | $200 \times 0.786 \times 0.990$ =156 |
| 3× 200□ | $301 \times 0.510 \times 0.965$ =148 | $301 \times 0.583 \times 0.977$ =171 | $301 \times 0.786 \times 0.990$ =234 |
| 3× 250□ | $366 \times 0.510 \times 0.965$ =180 | $366 \times 0.583 \times 0.977$ =208 | $366 \times 0.786 \times 0.990$ =285 |
| 3× 325□ | $448 \times 0.510 \times 0.965$ =220 | $448 \times 0.583 \times 0.977$ =255 | $448 \times 0.786 \times 0.990$ =349 |

3. 7 あとがき

本章では、LCC と LCA の合算値がミニマムとなる電流値（環境配慮電流）を算出し、かつそれを 3 つの負荷電流パターン別に区分して算出することで、サイズ適正化の指針を明確にすることができた。これにより、細いケーブルではサイズ増大幅が大きく、太いケーブルでは小さくなるため、特に太いケーブルのように布設スペースに余裕のない場合でも受け入れ易くなる。さらに、工場のように負荷電流が大きくその通電ロス低減効果の大きい場合はサイズ増大幅が大きく、ビルのようにその逆の場合は小さくなるため、効率的に通電ロス低減、即ち、CO₂排出削減が図れることになる。今後は、この指針をもとに「環境配慮電流表」を作成し、国内規格化、さらに国際規格化へと進める考えである。

参考文献

- 1) 内線規程 (JEAC 8001-2005) : 「1340 節 (許容電流) の資料 1-3-3 の 3」、(社) 日本電気協会需要設備専門部会
- 2) IEC 60287-3-2-am1 「Electric cables - Calculation of the current rating - Part 3 : Sections on operating conditions - Section 2 : Economic optimization of power cable size」 (1996)
- 3) (社) 日本電線工業会・内部資料第 11 号「絶縁電線通則」
- 4) (財) 建設物価調査会 : 「月刊・建設物価」、2008 年 11 月号、ケーブル・電線 (5) と配線工事 (2)、関東価格
- 5) 益尾和彦 : 「LCA を重視した電線ケーブルの環境配慮設計」、電気と工事、Vol. 47、No. 1、pp. 79~85 (2006)
- 6) 松原秀勇 : 「三菱配電用トップランナー油入変圧器 N シリーズの開発」、産業と電気 (関西電気協会)、Vol. 655、No. 3、pp. 56~60、図 6 (2007)
- 7) JCS 0168-1 「33kV 以下電力ケーブルの許容電流計算—第 1 部 : 計算式および定数」、日本電線工業会規格 (2004 年改正版)
- 8) 電気事業連合会 : 「電気事業における環境行動計画」 (2006 年 9 月 22 日)、p. 3 <2005 年度の実績>
- 9) Ernst Ulrich von Weizacker、Amory B. Lovins、L. Hunter Lovins (佐々木建 訳) : 「ファクター 4」、(財) 省エネルギーセンター (1998)
- 10) 機械工業経済研究報告書 H19-4-5A : 「電線・ケーブルのリサイクルと環境負荷・環境効率に関する調査」、(財) 機械振興協会経済研究所、(社) 電線総合技術センター (2008)

第4章 サイズアップによる日本全国の

通電ロス低減量・CO₂排出削減量の算出

4. 1 まえがき

前章では、経済性 (LCC) と環境性 (LCA) を考慮した電力ケーブルの最適電流（「環境配慮電流」）の算出理論を開発した。本章では、「環境配慮電流」に基づき、需要家（工場・ビル）構内の低圧 CV-T ケーブルを全てサイズアップ品に置き替えた時の通電ロス低減量・CO₂排出削減量について、工場・ビルの施主、ゼネコン、サブコン、設計事務所、エンジニアリング会社、保守・メンテナンス会社などの電気設計関係者へのアンケート・聞き込み調査で得られた諸データをもとに試算を行い、それらの日本全体の通電ロス量・CO₂排出量に対する比率を求める。

4. 2 最大負荷電流値の調査・推定

前章までは、理論上、電線サイズが許容電流に基づき決定されることを前提にしたが、本章では現場でのサイズ決定の実態調査の結果を前提にする。CV-T ケーブルに流れている最大負荷電流（ピーク値電流）を求めるために、電気工事の設計段階における、ケーブルの導体サイズ決定の手順（プロセス）についてアンケート・聞き込み調査を行った。その結果、以下のプロセスを経てサイズ決定がなされていることがわかった。

プロセス (1)：当該ケーブルの負荷の容量（複数の負荷の場合はその総和）から、次式により最大負荷電流 $I_{100\%}$ (A) を求める。

$$I_{100\%} = (W_0 \times 10^3 \times z) / (\sqrt{3} \times E \times \eta \times pf) \quad \cdots \cdots (II. 4. 1)$$

W_0 ： 負荷の容量 (kW)

z ： 需要率（複数の負荷の場合）

E ： 配電電圧

η ： 負荷（誘導電動機）の効率

pf ： 負荷（誘導電動機）の力率

ここで、工場・ビルの場合、配電電圧 E は主として 210V である。また、

負荷の効率 η は通常 0.9 程度、負荷の力率 pf は通常 0.85 程度である。

プロセス(2)：ケーブル各サイズの許容電流 I_0 (空中1条布設、日射の影響なし) に、その布設方法から一義的に決まる低減率 λ を乗じる。その結果得られた新しい許容電流 I_0' ($I_0 \times \lambda$) に基づき、上記の $I_{100\%}$ を許容する最小サイズで仮決定する。なお、工場・ビルでの布設方法は、ラック、ダクト、ピット、電線管などによるのが一般的で、1条布設と多条布設の場合により、また多条布設の場合はその離隔距離により低減率 λ を決定する。工場の場合はおよそ $\lambda = 0.7$ (6条密接布設)、ビルの場合はおよそ $\lambda = 0.8$ (3条密接布設) である。

プロセス(3)：上記の $I_{100\%}$ に電動機の起動時電流上昇倍率 σ を乗じる。その結果得られた電流値 ($I_{100\%} \times \sigma$) に基づき、遮断器の定格容量(AT、アンペア・トリップ) を決定する。なお、工場の場合はおよそ $\sigma = 1.4$ 、ビルの場合は $\sigma = 1.0 \sim 1.2$ である。遮断器は、通常 図 II. 4. 1 に示す通り設置されており¹⁾、異常な過電流によって遮断動作するまでの間は、ケーブルが熱的ダメージを受けてはならないため、上記の仮決定サイズの許容電流 I_0' が遮断容量値より大きいことを確かめる必要がある。仮に、遮断容量値より小さい場合は、上のサイズを選び、その許容電流 I_0' が遮断容量値より大きくなることを確かめ、そのサイズで再決定する。

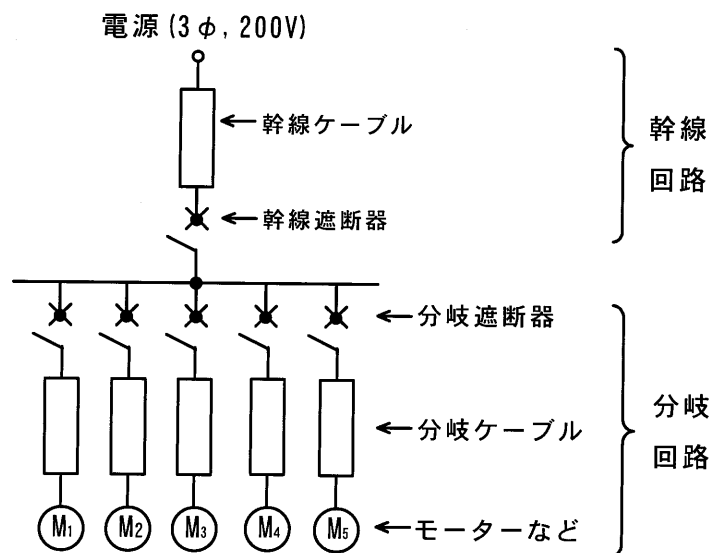


図 II. 4. 1 遮断器によるケーブル等の保護回路¹⁾

プロセス (4) : 当該ケーブルの布設長 ℓ から、次式に示す屋内配線などケーブル布設長が比較的短い場合の簡易式²⁾により、上記の再決定サイズの電圧降下率 e (%) を求め、規定値より小さいことを確かめる。仮に、規定値より大きい場合は、上のサイズを選び、その電圧降下率が規定値より小さくなることを確かめ、そのサイズで最終決定する。なお、電圧降下の規定値²⁾は、 $\ell < 60\text{m}$ の場合 $e = 2\%$ 以下、 $60\text{m} < \ell < 120\text{m}$ の場合 $e = 5\%$ 以下、 $\ell > 120\text{m}$ の場合 $e = 6\%$ 以下 である。

$$e = \{ (30.8 \times \ell \times I_{100\%}) / (1000 \times S \times 210) \} \times 100 \quad \cdots \cdots (\text{II. 4. 2})$$

ℓ : ケーブル長 (m)

S : ケーブル導体断面積 (mm^2)

具体的に、負荷の容量 W_0 が $10\text{kW} \sim 100\text{kW}$ の各場合におけるサイズ決定の実態調査を行った。結果を表 II. 4. 1、表 II. 4. 2 に示す。表に示すように、最大負荷電流値からサイズが決定されるので、逆に、決定サイズからその最大負荷電流値を推定することができる。表 II. 4. 1、表 II. 4. 2 では、決定サイズごとに、その許容電流値 I_0 に対する最大負荷電流値 $I_{100\%}$ の比率 α を求めた。(表中○印で示す。) その結果、比率 α は工場とビルそれぞれ以下の通りとなった。

工場の場合 $\cdots \cdots \alpha \approx 0.45$

ビルの場合 $\cdots \cdots \alpha \approx 0.55$

4. 3 環境配慮電流表に基づくサイズ決定

前節で求めた α をもとに、(1) プラント工場ほか、(2) 一般工場ほか、(3) ビルほかの 3 つのケース別に最大負荷電流値 $I_{100\%}$ が求まり、前章の表 II. 3. 8 で示した「環境配慮電流表 (その 2)」より、増大すべき最適サイズは表 II. 4. 3 に示すように決まる。例えば、(1) プラント工場ほかの 38□ の場合、その最大負荷電流 (70 A) が環境配慮電流値の 51A (60□) $\sim 80\text{A}$ (100□) の間にあることから、上のサイズの 100□ が増大すべき最適サイズとなる。なお、環境配慮電流表に基づきサイズ決定する場合、流れる電流が極めて小さいため、前述の許容電流 (低減率)、遮断電流、電圧降下などを考慮する必要がなく、環境配慮電流値のみで一義的にサイズ決定されることになる。

表Ⅱ. 4. 1 ケーブルサイズ決定プロセス (工場の場合)

| 負荷容量 | 低減率(上段) ケーブル長(下段) | サイズ決定プロセス |
|-------|----------------------|---|
| 10kW | 0.70 | (1) $(10 \times 10^3 \times 1.0) / (\sqrt{3} \times 210 \times 0.90 \times 0.85) = 36A$ |
| | | (2) $62(8^{\square}) \times 0.70 = 43A > 36A$ |
| | 50m | (3) $36 \times 1.4 = 50A (\rightarrow 50AT)$ |
| | | $86(14^{\square}) \times 0.70 = 60A > 50AT$ |
| 20kW | 0.70 | (4) $\{(30.8 \times 50 \times 36) / (1000 \times 14 \times 210)\} \times 100 = 1.9\% < 2\%$ |
| | | (決定サイズ) $3 \times 14^{\square}(86A) \Rightarrow \alpha = (36/86) = \underline{0.42}$ |
| | 100m | (1) $(20 \times 10^3 \times 1.0) / (\sqrt{3} \times 210 \times 0.90 \times 0.85) = 72A$ |
| | | (2) $155(38^{\square}) \times 0.70 = 109A > 72A$ |
| 30kW | 0.70 | (3) $72 \times 1.4 = 101A (\rightarrow 100AT)$ |
| | | $155(38^{\square}) \times 0.70 = 109A > 100AT$ |
| | 125m | (4) $\{(30.8 \times 100 \times 72) / (1000 \times 38 \times 210)\} \times 100 = 2.8\% < 5\%$ |
| | | (決定サイズ) $3 \times 38^{\square}(155A) \Rightarrow \alpha = (72/155) = \underline{0.46}$ |
| 40kW | 0.70 | (1) $(30 \times 10^3 \times 1.0) / (\sqrt{3} \times 210 \times 0.90 \times 0.85) = 108A$ |
| | | (2) $210(60^{\square}) \times 0.70 = 147A > 108A$ |
| | 150m | (3) $108 \times 1.4 = 151A (\rightarrow 150AT)$ |
| | | $290(100^{\square}) \times 0.70 = 203A > 150AT$ |
| 50kW | 0.70 | (4) $\{(30.8 \times 125 \times 108) / (1000 \times 100 \times 210)\} \times 100 = 2.0\% < 6\%$ |
| | | (決定サイズ) $3 \times 100^{\square}(290A) \Rightarrow \alpha = (108/290) = \underline{0.37}$ |
| | 175m | (1) $(40 \times 10^3 \times 1.0) / (\sqrt{3} \times 210 \times 0.90 \times 0.85) = 144A$ |
| | | (2) $210(60^{\square}) \times 0.70 = 147A > 144A$ |
| 60kW | 0.70 | (3) $144 \times 1.4 = 202A (\rightarrow 200AT)$ |
| | | $290(100^{\square}) \times 0.70 = 203A > 200AT$ |
| | 200m | (4) $\{(30.8 \times 150 \times 144) / (1000 \times 100 \times 210)\} \times 100 = 3.2\% < 6\%$ |
| | | (決定サイズ) $3 \times 100^{\square}(290A) \Rightarrow \alpha = (144/290) = \underline{0.50}$ |
| 70kW | 0.70 | (1) $(50 \times 10^3 \times 1.0) / (\sqrt{3} \times 210 \times 0.90 \times 0.85) = 180A$ |
| | | (2) $290(100^{\square}) \times 0.70 = 203A > 180A$ |
| | 200m | (3) $180 \times 1.4 = 252A (\rightarrow 250AT)$ |
| | | $380(150^{\square}) \times 0.70 = 266A > 250AT$ |
| 80kW | 0.70 | (4) $\{(30.8 \times 175 \times 180) / (1000 \times 150 \times 210)\} \times 100 = 3.1\% < 6\%$ |
| | | (決定サイズ) $3 \times 150^{\square}(380A) \Rightarrow \alpha = (180/380) = \underline{0.47}$ |
| | 200m | (1) $(60 \times 10^3 \times 1.0) / (\sqrt{3} \times 210 \times 0.90 \times 0.85) = 216A$ |
| | | (2) $380(150^{\square}) \times 0.70 = 266A > 216A$ |
| 90kW | 0.70 | (3) $216 \times 1.4 = 302A (\rightarrow 300AT)$ |
| | | $465(200^{\square}) \times 0.70 = 326A > 300AT$ |
| | 200m | (4) $\{(30.8 \times 200 \times 216) / (1000 \times 200 \times 210)\} \times 100 = 3.2\% < 6\%$ |
| | | (決定サイズ) $3 \times 200^{\square}(465A) \Rightarrow \alpha = (216/465) = \underline{0.46}$ |
| 100kW | 0.70 | (1) $(70 \times 10^3 \times 1.0) / (\sqrt{3} \times 210 \times 0.90 \times 0.85) = 252A$ |
| | | (2) $465(200^{\square}) \times 0.70 = 326A > 252A$ |
| | 200m | (3) $252 \times 1.4 = 353A (\rightarrow 350AT)$ |
| | | $535(250^{\square}) \times 0.70 = 375A > 350AT$ |
| 110kW | 0.70 | (4) $\{(30.8 \times 200 \times 252) / (1000 \times 250 \times 210)\} \times 100 = 3.0\% < 6\%$ |
| | | (決定サイズ) $3 \times 250^{\square}(535A) \Rightarrow \alpha = (252/535) = \underline{0.47}$ |
| | 200m | (1) $(80 \times 10^3 \times 1.0) / (\sqrt{3} \times 210 \times 0.90 \times 0.85) = 288A$ |
| | | (2) $465(200^{\square}) \times 0.70 = 326A > 288A$ |
| 120kW | 0.70 | (3) $288 \times 1.4 = 403A (\rightarrow 400AT)$ |
| | | $635(325^{\square}) \times 0.70 = 445A > 400AT$ |
| | 200m | (4) $\{(30.8 \times 200 \times 288) / (1000 \times 325 \times 210)\} \times 100 = 2.6\% < 6\%$ |
| | | (決定サイズ) $3 \times 325^{\square}(635A) \Rightarrow \alpha = (288/635) = \underline{0.45}$ |
| 130kW | 0.70 | (1) $(90 \times 10^3 \times 1.0) / (\sqrt{3} \times 210 \times 0.90 \times 0.85) = 323A$ |
| | | (2) $465(200^{\square}) \times 0.70 = 326A > 323A$ |
| | 200m | (3) $323 \times 1.4 = 452A (\rightarrow 450AT)$ |
| | | $760(150^{\square} \text{ダブル}) \times 0.70 = 532A > 450AT$ |
| 140kW | 0.70 | (4) $\{(30.8 \times 200 \times 323) / (1000 \times 300 \times 210)\} \times 100 = 3.2\% < 6\%$ |
| | | (決定サイズ) $3 \times 150^{\square} \text{ダブル}(760A) \Rightarrow \alpha = (323/760) = \underline{0.43}$ |
| | 200m | (1) $(100 \times 10^3 \times 1.0) / (\sqrt{3} \times 210 \times 0.90 \times 0.85) = 359A$ |
| | | (2) $535(250^{\square}) \times 0.70 = 375A > 359A$ |
| 150kW | 0.70 | (3) $359 \times 1.4 = 503A (\rightarrow 500AT)$ |
| | | $760(150^{\square} \text{ダブル}) \times 0.70 = 532A > 500AT$ |
| | 200m | (4) $\{(30.8 \times 200 \times 359) / (1000 \times 300 \times 210)\} \times 100 = 3.5\% < 6\%$ |
| | | (決定サイズ) $3 \times 150^{\square} \text{ダブル}(760A) \Rightarrow \alpha = (359/760) = \underline{0.47}$ |
| | | α (平均) = $\underline{0.45}$ |

表Ⅱ.4.2 ケーブルサイズ決定プロセス（ビルの場合）

| 負荷容量 | 低減率(上段) | | サイズ決定プロセス |
|-------|-----------|--|--|
| | ケーブル長(下段) | | |
| 10kW | 0.80 | | (1) $(10 \times 10^3 \times 1.0) / (\sqrt{3} \times 210 \times 0.90 \times 0.85) = 36A$ |
| | | | (2) $46(5.5^{\square}) \times 0.80 = 37A > 36A$ |
| | 30m | | (3) $36 \times 1.2 = 43A (\rightarrow 50AT)$ |
| | | | $62(8^{\square}) \times 0.80 = 50A > 50AT$ |
| 20kW | 0.80 | | (4) $[(30.8 \times 30 \times 36) / (1000 \times 8 \times 210)] \times 100 = 2.0\% < 2\%$ |
| | | | (決定サイズ) $3 \times 8^{\square}(62A) \Rightarrow \alpha = (36/62) = \underline{(0.58)}$ |
| | 50m | | (1) $(20 \times 10^3 \times 1.0) / (\sqrt{3} \times 210 \times 0.90 \times 0.85) = 72A$ |
| | | | (2) $110(22^{\square}) \times 0.80 = 88A > 72A$ |
| 30kW | 0.80 | | (3) $72 \times 1.2 = 86A (\rightarrow 100AT)$ |
| | | | $155(38^{\square}) \times 0.80 = 124A > 100AT$ |
| | 50m | | (4) $[(30.8 \times 50 \times 72) / (1000 \times 38 \times 210)] \times 100 = 1.4\% < 2\%$ |
| | | | (決定サイズ) $3 \times 38^{\square}(155A) \Rightarrow \alpha = (72/155) = \underline{(0.46)}$ |
| 40kW | 0.80 | | (1) $(30 \times 10^3 \times 1.0) / (\sqrt{3} \times 210 \times 0.90 \times 0.85) = 108A$ |
| | | | (2) $155(38^{\square}) \times 0.80 = 124A > 108A$ |
| | 50m | | (3) $108 \times 1.2 = 130A (\rightarrow 150AT)$ |
| | | | $210(60^{\square}) \times 0.80 = 168A > 150AT$ |
| 50kW | 0.80 | | (4) $[(30.8 \times 50 \times 108) / (1000 \times 60 \times 210)] \times 100 = 1.3\% < 2\%$ |
| | | | (決定サイズ) $3 \times 60^{\square}(210A) \Rightarrow \alpha = (108/210) = \underline{(0.51)}$ |
| | 50m | | (1) $(40 \times 10^3 \times 1.0) / (\sqrt{3} \times 210 \times 0.90 \times 0.85) = 144A$ |
| | | | (2) $210(60^{\square}) \times 0.80 = 168A > 144A$ |
| 60kW | 0.80 | | (3) $144 \times 1.2 = 173A (\rightarrow 175AT)$ |
| | | | $290(100^{\square}) \times 0.80 = 232A > 175AT$ |
| | 50m | | (4) $[(30.8 \times 50 \times 144) / (1000 \times 100 \times 210)] \times 100 = 1.1\% < 2\%$ |
| | | | (決定サイズ) $3 \times 100^{\square}(290A) \Rightarrow \alpha = (144/290) = \underline{(0.50)}$ |
| 70kW | 0.80 | | (1) $(50 \times 10^3 \times 0.9) / (\sqrt{3} \times 210 \times 0.90 \times 0.85) = 162A$ |
| | | | (2) $210(60^{\square}) \times 0.80 = 168A > 162A$ |
| | 75m | | (3) $162 \times 1.2 = 194A (\rightarrow 200AT)$ |
| | | | $290(100^{\square}) \times 0.80 = 232A > 200AT$ |
| 80kW | 0.80 | | (4) $[(30.8 \times 75 \times 162) / (1000 \times 100 \times 210)] \times 100 = 1.8\% < 5\%$ |
| | | | (決定サイズ) $3 \times 100^{\square}(290A) \Rightarrow \alpha = (162/290) = \underline{(0.56)}$ |
| | 75m | | (1) $(60 \times 10^3 \times 0.9) / (\sqrt{3} \times 210 \times 0.90 \times 0.85) = 194A$ |
| | | | (2) $290(100^{\square}) \times 0.80 = 232A > 194A$ |
| 90kW | 0.80 | | (3) $194 \times 1.2 = 233A (\rightarrow 250AT)$ |
| | | | $380(150^{\square}) \times 0.80 = 304A > 250AT$ |
| | 75m | | (4) $[(30.8 \times 75 \times 194) / (1000 \times 150 \times 210)] \times 100 = 1.4\% < 5\%$ |
| | | | (決定サイズ) $3 \times 150^{\square}(380A) \Rightarrow \alpha = (194/380) = \underline{(0.51)}$ |
| 100kW | 0.80 | | (1) $(70 \times 10^3 \times 0.9) / (\sqrt{3} \times 210 \times 0.90 \times 0.85) = 226A$ |
| | | | (2) $290(100^{\square}) \times 0.80 = 232A > 226A$ |
| | 75m | | (3) $226 \times 1.2 = 271A (\rightarrow 275AT)$ |
| | | | $380(150^{\square}) \times 0.80 = 304A > 275AT$ |
| 110kW | 0.80 | | (4) $[(30.8 \times 75 \times 226) / (1000 \times 150 \times 210)] \times 100 = 1.7\% < 5\%$ |
| | | | (決定サイズ) $3 \times 150^{\square}(380A) \Rightarrow \alpha = (226/380) = \underline{(0.59)}$ |
| | 100m | | (1) $(80 \times 10^3 \times 0.8) / (\sqrt{3} \times 210 \times 0.90 \times 0.85) = 230A$ |
| | | | (2) $290(100^{\square}) \times 0.80 = 232A > 230A$ |
| 120kW | 0.80 | | (3) $230 \times 1.2 = 276A (\rightarrow 300AT)$ |
| | | | $465(200^{\square}) \times 0.80 = 372A > 300AT$ |
| | 100m | | (4) $[(30.8 \times 100 \times 230) / (1000 \times 200 \times 210)] \times 100 = 1.7\% < 5\%$ |
| | | | (決定サイズ) $3 \times 200^{\square}(465A) \Rightarrow \alpha = (230/465) = \underline{(0.49)}$ |
| 130kW | 0.80 | | (1) $(90 \times 10^3 \times 0.8) / (\sqrt{3} \times 210 \times 0.90 \times 0.85) = 259A$ |
| | | | (2) $380(150^{\square}) \times 0.80 = 304A > 259A$ |
| | 100m | | (3) $259 \times 1.2 = 311A (\rightarrow 350AT)$ |
| | | | $465(200^{\square}) \times 0.80 = 372A > 350A$ |
| 140kW | 0.80 | | (4) $[(30.8 \times 100 \times 259) / (1000 \times 200 \times 210)] \times 100 = 1.9\% < 5\%$ |
| | | | (決定サイズ) $3 \times 200^{\square}(465A) \Rightarrow \alpha = (259/465) = \underline{(0.56)}$ |
| | 100m | | (1) $(100 \times 10^3 \times 0.8) / (\sqrt{3} \times 210 \times 0.90 \times 0.85) = 288A$ |
| | | | (2) $380(150^{\square}) \times 0.80 = 304A > 288A$ |
| 150kW | 0.80 | | (3) $288 \times 1.2 = 346A (\rightarrow 350AT)$ |
| | | | $465(200^{\square}) \times 0.80 = 372A > 350AT$ |
| | 100m | | (4) $[(30.8 \times 100 \times 288) / (1000 \times 200 \times 210)] \times 100 = 2.1\% < 5\%$ |
| | | | (決定サイズ) $3 \times 200^{\square}(465A) \Rightarrow \alpha = (288/465) = \underline{(0.62)}$ |
| | | | α (平均) = $\underline{(0.54)}$ |

表Ⅱ. 4. 3 環境配慮電流表による最適サイズの決定

| | サイズ | 環境配慮電流 (A) | 最大負荷電流 (A) | サイズアップ (サイズアップ数) |
|-----------------|--------|---------------|-------------------------|----------------------|
| (1) プラント工場ほか | 3×8□ | 7 | $62 \times 0.45 = 28$ | → 3×38□ (3 サイズ) |
| | 3×14□ | 11 | $86 \times 0.45 = 39$ | → 3×60□ (3 サイズ) |
| | 3×22□ | 18 | $110 \times 0.45 = 50$ | → 3×60□ (2 サイズ) |
| | 3×38□ | 31 | $155 \times 0.45 = 70$ | → 3×100□ (2 サイズ) |
| | 3×60□ | 51 | $210 \times 0.45 = 95$ | → 3×150□ (2 サイズ) |
| | 3×100□ | 80 | $290 \times 0.45 = 131$ | → 3×200□ (2 サイズ) |
| | 3×150□ | 98 | $380 \times 0.45 = 171$ | → 3×250□ (2 サイズ) |
| | 3×200□ | 148 | $465 \times 0.45 = 209$ | → 3×325□ (2 サイズ) |
| | 3×250□ | 180 | $535 \times 0.45 = 241$ | → 3×200□ ダブル (2 サイズ) |
| | 3×325□ | 220 | $635 \times 0.45 = 286$ | → 3×200□ ダブル (1 サイズ) |
| (2) 一般工場ほか | 3×8□ | 9 | $62 \times 0.45 = 28$ | → 3×38□ (3 サイズ) |
| | 3×14□ | 13 | $86 \times 0.45 = 39$ | → 3×60□ (3 サイズ) |
| | 3×22□ | 21 | $110 \times 0.45 = 50$ | → 3×60□ (2 サイズ) |
| | 3×38□ | 36 | $155 \times 0.45 = 70$ | → 3×100□ (2 サイズ) |
| | 3×60□ | 59 | $210 \times 0.45 = 95$ | → 3×150□ (2 サイズ) |
| | 3×100□ | 93 | $290 \times 0.45 = 131$ | → 3×200□ (2 サイズ) |
| | 3×150□ | 114 | $380 \times 0.45 = 171$ | → 3×200□ (1 サイズ) |
| | 3×200□ | 171 | $465 \times 0.45 = 209$ | → 3×325□ (2 サイズ) |
| | 3×250□ | 208 | $535 \times 0.45 = 241$ | → 3×325□ (1 サイズ) |
| | 3×325□ | 255 | $635 \times 0.45 = 286$ | → 3×200□ ダブル (1 サイズ) |
| (3) ビルほか | 3×8□ | 12 | $62 \times 0.55 = 34$ | → 3×38□ (3 サイズ) |
| | 3×14□ | 18 | $86 \times 0.55 = 47$ | → 3×38□ (2 サイズ) |
| | 3×22□ | 29 | $110 \times 0.55 = 61$ | → 3×60□ (2 サイズ) |
| | 3×38□ | 50 | $155 \times 0.55 = 85$ | → 3×100□ (2 サイズ) |
| | 3×60□ | 81 | $210 \times 0.55 = 116$ | → 3×100□ (1 サイズ) |
| | 3×100□ | 127 | $290 \times 0.55 = 160$ | → 3×200□ (2 サイズ) |
| | 3×150□ | 156 | $380 \times 0.55 = 209$ | → 3×200□ (1 サイズ) |
| | 3×200□ | 234 | $465 \times 0.55 = 256$ | → 3×250□ (1 サイズ) |
| | 3×250□ | 285 | $535 \times 0.55 = 294$ | → 3×325□ (1 サイズ) |
| | 3×325□ | 349 | $635 \times 0.55 = 349$ | → 同左 |

4. 4 ケーブル布設長

日本全国のケーブル布設長については、日本電線工業会統計から、過去 30 年 (1978～2008 年) の低圧 CV-T ケーブル出荷データを抽出して求めた。その結果、30 年の総出荷長は 2,000 千 km であることがわかった。CV-T は、販売ルートより判断して、全部が国内の建設・電販市場向けに出荷されており、かつ、輸入も輸出もなく、その出荷長がそのまま国内の工場・ビルでの布設長と考えてよい。ただし、出荷ケーブル長のうち 約 5% は、ドラムから切り取り後の残品や布設時の余尺品として廃棄され、実際には布設通電されないことを考慮すると、日本全国の総布設長は $2,000 \times 0.95 = 1,900$ 千 km となる。

次に、総布設長を、①一般工場、②プラント工場、③事務所ビル、④スーパー・百貨店、⑤病院、⑥大学・研究所、⑦ホテル・旅館、⑧その他・公共施設等の 8 つの分野に配分する必要がある。

第1種・第2種指定工場（狭義の工場だけでなく事務所ビルや大型店舗なども含み、日本全国の総指定工場数は13,551である）の布設ケーブル長については、既報³⁾のデータを用い、それ以下の規模のものについては、第2種の各分野別布設ケーブル長比率と同じ比率で配分した。また、第2種とそれ以下の規模における一般工場とプラント工場の布設ケーブル長比率については、電事連発表の電力消費量の業種別比率（2007年データ）、即ち、一般工場（機械、電機、食料品、その他）対 プラント工場（鉄鋼、石油・化学、繊維、セメント、非鉄、紙・パルプ）が62対38を用いて配分した。結果を表Ⅱ.4.4に示す。これより、一般工場（48%）とプラント工場（35%）で全体の83%を占めることがわかる。なお、工場構内にある事務所棟や研究棟などは、工場の内数としている。

表Ⅱ.4.4 CV-T ケーブル布設長（各サイズ、各分野ごと）

（単位：千km）

（単位：1 km）

| | ① 一般工場 （機械、電機 ほか） | ② プラント工場 （鉄鋼、石油化学 ほか） | ③ 事務所 ビル | ④ スーパー・ 百貨店 | ⑤ 病院 | ⑥ 大学・ 研究所 | ⑦ ホテル・ 旅館 | ⑧ その他 公共施設 等 | （合計） | |
|----------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------|-------------------|------------|-----------------|-----------------|-----------------------|----------------|------|
| 3 × 8 [□] | 32 | 24 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 61 | |
| 3 × 14 [□] | 130 | 95 | 8 | 9 | 4 | 17 | 1 | 4 | 268 | |
| 3 × 22 [□] | 130 | 95 | 8 | 8 | 4 | 17 | 1 | 4 | 267 | |
| 3 × 38 [□] | 130 | 95 | 16 | 11 | 5 | 9 | 2 | 9 | 277 | |
| 3 × 60 [□] | 130 | 95 | 16 | 10 | 5 | 7 | 1 | 9 | 273 | |
| 3 × 100 [□] | 130 | 95 | 15 | 10 | 5 | 7 | 1 | 8 | 271 | |
| 3 × 150 [□] | 97 | 72 | 5 | 12 | 6 | 3 | 1 | 3 | 199 | |
| 3 × 200 [□] | 65 | 47 | 3 | 12 | 6 | 3 | 1 | 3 | 140 | |
| 3 × 250 [□] | 46 | 33 | 3 | 11 | 6 | 2 | 1 | 2 | 104 | |
| 3 × 325 [□] | 20 | 14 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 40 | |
| 合計 | 910 (48%) | 665 (35%) | 77 (4%) | 86 (5%) | 43 (2%) | 66 (3%) | 9 (1%) | 44 (2%) | 1900 (100%) | |
| 内 訳 | 第1種 | 275 | 275 | 10 | 8 | 7 | 16 | 2 | 7 | 600 |
| | 第2種 | 106 | 65 | 11 | 13 | 6 | 8 | 1 | 6 | 216 |
| | それ以下 | 529 | 325 | 56 | 65 | 30 | 42 | 6 | 31 | 1084 |

4. 5 ケーブルの需要率

前節で求めた日本全国のケーブル布設長の内、実際に通電使用されているケーブルの比率、即ち、需要率を求める必要がある。一般に、電灯、動力、電熱などの負荷設備は、その全てが同時に使用されることはなく、そのため工場の最大需要電力 (kW) は負荷設備容量の合計 (kW) より小さい。前者の後者に対する比 (次式) を 需要率 z (%) と言う。

$$z = \{ \text{最大需要電力 (kW)} / \text{負荷設備容量の合計 (kW)} \} \times 100 \quad \cdots \cdots (II. 4. 3)$$

需要率は、変圧器の 2 次側電流、即ち負荷電流パターンから求めることができる。負荷電流パターンとは、変圧器の 2 次側 (低圧側) 電流の測定により求まり、変圧器の定格電流値を 100% として、各時刻における電流値をその % 比率 (負荷率) で表したものである。図 II. 4. 2 に ①～⑧の 8 つの分野ごとの負荷電流パターンを示すが、これらは文献類^{4), 5), 6), 7), 8)} の調査で得たデータと大手電気工事会社のデータとをもとに総合的に解析して求めたものである。具体的には、電灯負荷、動力負荷 (夏期)、動力負荷 (夏期以外) に分け、1 日 24 時間の毎時間ごとの負荷率をグラフにプロットしてパターン曲線を求め、得られた 3 つのパターン曲線に、電灯負荷と動力負荷 (電灯負荷以外) の比率 (例えば、①の一般工場の場合は 2 対 8)、及び夏期 (3 ヶ月) と夏期以外 (9 ヶ月) の比率 (3 対 9) を乗じることで、加重平均して 1 つのパターン曲線を求めた。なお、用いた総データ点数 n を各グラフの左上部に示している。この負荷電流パターンより、その最大需要電力 (ピーク値) の、負荷設備容量の合計 (この場合、変圧器の定格容量) に対する比率、即ち需要率 z を求め、それを各グラフの右上部に示した。

変圧器の負荷電流パターンは、それに繋がる 2 次側ケーブルの通電電流パターン (複数のケーブルの場合はそれらを平均したパターン) と同じことから、この変圧器の需要率はケーブルにも適用できる。また、得られた z の値より、①～⑧の 8 つの分野は、前章の等価負荷率 x の区分と同様、おおよそ (1) ～ (3) の 3 つのケースに区分できる。

- (1) プラント工場ほか (②、⑤) $z \approx 70\%$
- (2) 一般工場ほか (①、④) $z \approx 65\%$
- (3) ビルほか (③、⑥、⑦、⑧) $z \approx 55\%$

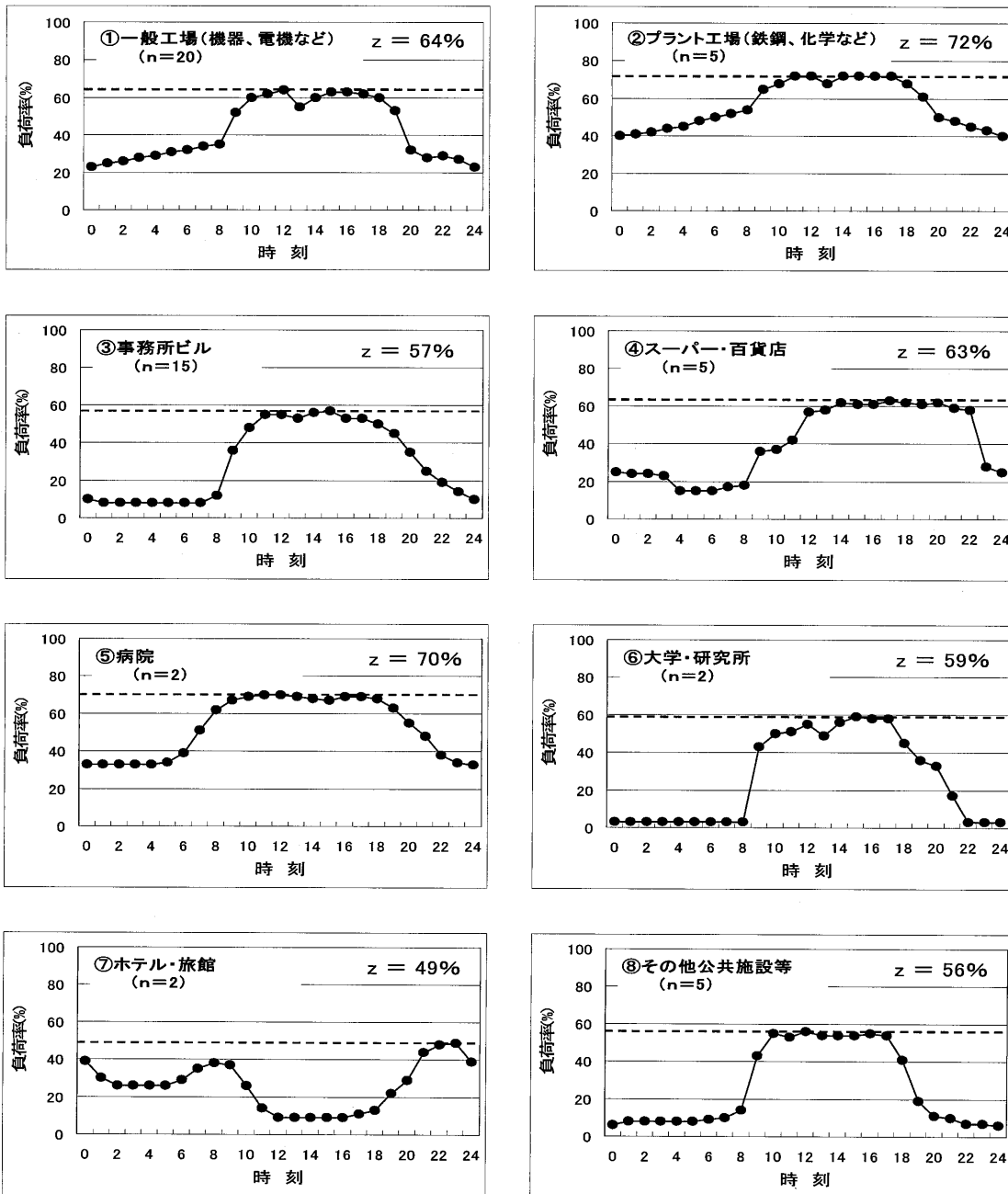


図 11.4.2 負荷電流パターンと需要率

4. 6 通電ロス低減量の算出

日本全国の工場・ビルの低圧 CV-T ケーブルによる、年間の総通電ロス量 W (百万 kWh) は次式で試算できる。

$$W = \Sigma \{3 \times (I_{100\%} \times x)^2 \times R \times 10^{-3} \times 24 \times y \times L \times z\} \dots\dots\dots (II. 4. 4)$$

$I_{100\%}$: 最大負荷電流 (A)

x : 等価負荷率

R : 導体抵抗値 (20℃) (Ω/km)

y : 年間稼働日数 (日)

L : ケーブル布設長 (千 km)

z : 需要率

また、日本全国でサイズアップ品への置き替えが完了した時点での、年間の総通電ロス低減量 ΔW (百万 kWh) は次式で計算できる。

$$\Delta W = \Sigma \{3 \times (I_{100\%} \times x)^2 \times (R_1 - R_2) \times 10^{-3} \times 24 \times y \times L \times z\} \dots\dots\dots (II. 4. 5)$$

R_1 : サイズアップ前サイズの導体抵抗値 (20℃) (Ω/km)

R_2 : サイズアップ後サイズの導体抵抗値 (20℃) (Ω/km)

計算の結果を、(1) ~ (3) のケースごとに、表 II. 4. 5 ~ 7 に示す。

表 II. 4. 5 プラント工場ほかにおける通電ロス低減量 (日本全国)

| サイズ | ケーブル布設長 L (千 km) | 年間通電ロス量 W (百万 kWh) |
|--------|---------------------|--|
| | | サイズアップによる年間通電ロス低減量 ΔW (百万 kWh) |
| 3×8□ | 24+1= 25 | $3 \times (28 \times 0.8)^2 \times 2.34 \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 25 \times 10^3 \times 0.70 = 444$ |
| | | $3 \times (28 \times 0.8)^2 \times (2.34 - 0.491) \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 25 \times 10^3 \times 0.70 = 351$ |
| 3×14□ | 95+4= 99 | $3 \times (39 \times 0.8)^2 \times 1.34 \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 99 \times 10^3 \times 0.70 = 1,953$ |
| | | $3 \times (39 \times 0.8)^2 \times (1.34 - 0.311) \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 99 \times 10^3 \times 0.70 = 1,499$ |
| 3×22□ | 95+4= 99 | $3 \times (50 \times 0.8)^2 \times 0.849 \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 99 \times 10^3 \times 0.70 = 2,033$ |
| | | $3 \times (50 \times 0.8)^2 \times (0.849 - 0.311) \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 99 \times 10^3 \times 0.70 = 1,289$ |
| 3×38□ | 95+5= 100 | $3 \times (70 \times 0.8)^2 \times 0.491 \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 100 \times 10^3 \times 0.70 = 2,328$ |
| | | $3 \times (70 \times 0.8)^2 \times (0.491 - 0.187) \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 100 \times 10^3 \times 0.70 = 1,441$ |
| 3×60□ | 95+5= 100 | $3 \times (95 \times 0.8)^2 \times 0.311 \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 100 \times 10^3 \times 0.70 = 2,716$ |
| | | $3 \times (95 \times 0.8)^2 \times (0.311 - 0.124) \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 100 \times 10^3 \times 0.70 = 1,633$ |
| 3×100□ | 95+5= 100 | $3 \times (131 \times 0.8)^2 \times 0.187 \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 100 \times 10^3 \times 0.70 = 3,105$ |
| | | $3 \times (131 \times 0.8)^2 \times (0.187 - 0.0933) \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 100 \times 10^3 \times 0.70 = 1,556$ |
| 3×150□ | 72+6= 78 | $3 \times (171 \times 0.8)^2 \times 0.124 \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 78 \times 10^3 \times 0.70 = 2,737$ |
| | | $3 \times (171 \times 0.8)^2 \times (0.124 - 0.0754) \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 78 \times 10^3 \times 0.70 = 1,073$ |
| 3×200□ | 47+6= 53 | $3 \times (209 \times 0.8)^2 \times 0.0933 \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 53 \times 10^3 \times 0.70 = 2,090$ |
| | | $3 \times (209 \times 0.8)^2 \times (0.0933 - 0.0579) \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 53 \times 10^3 \times 0.70 = 793$ |
| 3×250□ | 33+6= 39 | $3 \times (241 \times 0.8)^2 \times 0.0754 \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 39 \times 10^3 \times 0.70 = 1,653$ |
| | | $3 \times (241 \times 0.8)^2 \times (0.0754 - 0.0467) \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 39 \times 10^3 \times 0.70 = 629$ |
| 3×325□ | 14+1= 15 | $3 \times (286 \times 0.8)^2 \times 0.0579 \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 15 \times 10^3 \times 0.70 = 687$ |
| | | $3 \times (286 \times 0.8)^2 \times (0.0579 - 0.0467) \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 15 \times 10^3 \times 0.70 = 133$ |
| 合計 | L = 665+43 = 708 | W = 19,746 |
| | | $\Delta W = 10,397$ |

表Ⅱ. 4. 6 一般工場ほかにおける通電ロス低減量（日本全国）

| サイズ | ケーブル布設長 L (千km) | 年間通電ロス量 W (百万kWh) | |
|--------|--|---|--|
| | | サイズアップによる年間通電ロス低減量 ΔW (百万kWh) | |
| 3×8□ | 32+1= 33 | $3 \times (28 \times 0.7)^2 \times 2.34 \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 33 \times 10^3 \times 0.65 = 416$ | |
| | $3 \times (28 \times 0.7)^2 \times (2.34 - 0.491) \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 33 \times 10^3 \times 0.65 = 329$ | | |
| 3×14□ | 130+9= 139 | $3 \times (39 \times 0.7)^2 \times 1.34 \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 139 \times 10^3 \times 0.65 = 1,949$ | |
| | $3 \times (39 \times 0.7)^2 \times (1.34 - 0.311) \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 139 \times 10^3 \times 0.65 = 1,497$ | | |
| 3×22□ | 130+8= 138 | $3 \times (50 \times 0.7)^2 \times 0.849 \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 138 \times 10^3 \times 0.65 = 2,015$ | |
| | $3 \times (50 \times 0.7)^2 \times (0.849 - 0.311) \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 138 \times 10^3 \times 0.65 = 1,277$ | | |
| 3×38□ | 130+11= 141 | $3 \times (70 \times 0.7)^2 \times 0.491 \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 141 \times 10^3 \times 0.65 = 2,334$ | |
| | $3 \times (70 \times 0.7)^2 \times (0.491 - 0.187) \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 141 \times 10^3 \times 0.65 = 1,445$ | | |
| 3×60□ | 130+10= 140 | $3 \times (95 \times 0.7)^2 \times 0.311 \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 140 \times 10^3 \times 0.65 = 2,703$ | |
| | $3 \times (95 \times 0.7)^2 \times (0.311 - 0.124) \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 140 \times 10^3 \times 0.65 = 1,625$ | | |
| 3×100□ | 130+10= 140 | $3 \times (131 \times 0.7)^2 \times 0.187 \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 140 \times 10^3 \times 0.65 = 3,091$ | |
| | $3 \times (131 \times 0.7)^2 \times (0.187 - 0.0933) \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 140 \times 10^3 \times 0.65 = 1,549$ | | |
| 3×150□ | 97+12= 109 | $3 \times (171 \times 0.7)^2 \times 0.124 \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 109 \times 10^3 \times 0.65 = 2,719$ | |
| | $3 \times (171 \times 0.7)^2 \times (0.124 - 0.0933) \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 109 \times 10^3 \times 0.65 = 673$ | | |
| 3×200□ | 65+12= 77 | $3 \times (209 \times 0.7)^2 \times 0.0933 \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 77 \times 10^3 \times 0.65 = 2,159$ | |
| | $3 \times (209 \times 0.7)^2 \times (0.0933 - 0.0579) \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 77 \times 10^3 \times 0.65 = 819$ | | |
| 3×250□ | 46+11= 57 | $3 \times (241 \times 0.7)^2 \times 0.0754 \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 57 \times 10^3 \times 0.65 = 1,717$ | |
| | $3 \times (241 \times 0.7)^2 \times (0.0754 - 0.0579) \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 57 \times 10^3 \times 0.65 = 399$ | | |
| 3×325□ | 20+2= 22 | $3 \times (286 \times 0.7)^2 \times 0.0579 \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 22 \times 10^3 \times 0.65 = 717$ | |
| | $3 \times (286 \times 0.7)^2 \times (0.0579 - 0.0467) \times 10^{-3} \times (24 \times 300) \times 22 \times 10^3 \times 0.65 = 139$ | | |
| 合計 | L = 910+86 = 996 | W = 19,820 | |
| | | ΔW = 9,752 | |

表Ⅱ. 4. 7 ビルほかにおける通電ロス低減量（日本全国）

| サイズ | ケーブル布設長 L (千km) | 年間通電ロス量 W (百万kWh) | |
|--------|---|---|--|
| | | サイズアップによる年間通電ロス低減量 ΔW (百万kWh) | |
| 3×8□ | 1+1+0+1= 3 | $3 \times (34 \times 0.6)^2 \times 2.34 \times 10^{-3} \times (24 \times 225) \times 3 \times 10^3 \times 0.55 = 26$ | |
| | $3 \times (34 \times 0.6)^2 \times (2.34 - 0.491) \times 10^{-3} \times (24 \times 225) \times 3 \times 10^3 \times 0.55 = 21$ | | |
| 3×14□ | 8+17+1+4= 30 | $3 \times (47 \times 0.6)^2 \times 1.34 \times 10^{-3} \times (24 \times 225) \times 30 \times 10^3 \times 0.55 = 285$ | |
| | $3 \times (47 \times 0.6)^2 \times (1.34 - 0.491) \times 10^{-3} \times (24 \times 225) \times 30 \times 10^3 \times 0.55 = 180$ | | |
| 3×22□ | 8+17+1+4= 30 | $3 \times (61 \times 0.6)^2 \times 0.849 \times 10^{-3} \times (24 \times 225) \times 30 \times 10^3 \times 0.55 = 304$ | |
| | $3 \times (61 \times 0.6)^2 \times (0.849 - 0.311) \times 10^{-3} \times (24 \times 225) \times 30 \times 10^3 \times 0.55 = 193$ | | |
| 3×38□ | 16+9+2+9= 36 | $3 \times (85 \times 0.6)^2 \times 0.491 \times 10^{-3} \times (24 \times 250) \times 36 \times 10^3 \times 0.55 = 410$ | |
| | $3 \times (85 \times 0.6)^2 \times (0.491 - 0.187) \times 10^{-3} \times (24 \times 225) \times 36 \times 10^3 \times 0.55 = 254$ | | |
| 3×60□ | 16+7+1+9= 33 | $3 \times (116 \times 0.6)^2 \times 0.311 \times 10^{-3} \times (24 \times 250) \times 33 \times 10^3 \times 0.55 = 443$ | |
| | $3 \times (116 \times 0.6)^2 \times (0.311 - 0.187) \times 10^{-3} \times (24 \times 225) \times 33 \times 10^3 \times 0.55 = 177$ | | |
| 3×100□ | 15+7+1+8= 31 | $3 \times (160 \times 0.6)^2 \times 0.187 \times 10^{-3} \times (24 \times 225) \times 31 \times 10^3 \times 0.55 = 476$ | |
| | $3 \times (160 \times 0.6)^2 \times (0.187 - 0.0933) \times 10^{-3} \times (24 \times 225) \times 31 \times 10^3 \times 0.55 = 239$ | | |
| 3×150□ | 5+3+1+3= 12 | $3 \times (209 \times 0.6)^2 \times 0.124 \times 10^{-3} \times (24 \times 225) \times 12 \times 10^3 \times 0.55 = 208$ | |
| | $3 \times (209 \times 0.6)^2 \times (0.124 - 0.0933) \times 10^{-3} \times (24 \times 225) \times 12 \times 10^3 \times 0.55 = 52$ | | |
| 3×200□ | 3+3+1+3= 10 | $3 \times (256 \times 0.6)^2 \times 0.0933 \times 10^{-3} \times (24 \times 225) \times 10 \times 10^3 \times 0.55 = 196$ | |
| | $3 \times (256 \times 0.6)^2 \times (0.0933 - 0.0754) \times 10^{-3} \times (24 \times 225) \times 10 \times 10^3 \times 0.55 = 38$ | | |
| 3×250□ | 3+2+1+2= 8 | $3 \times (294 \times 0.6)^2 \times 0.0754 \times 10^{-3} \times (24 \times 225) \times 8 \times 10^3 \times 0.55 = 167$ | |
| | $3 \times (294 \times 0.6)^2 \times (0.0754 - 0.0579) \times 10^{-3} \times (24 \times 225) \times 8 \times 10^3 \times 0.55 = 39$ | | |
| 3×325□ | 2+0+0+1= 3 | $3 \times (349 \times 0.6)^2 \times 0.0579 \times 10^{-3} \times (24 \times 225) \times 3 \times 10^3 \times 0.55 = 68$ | |
| | $3 \times (349 \times 0.6)^2 \times (0.0579 - 0.0579) \times 10^{-3} \times (24 \times 225) \times 3 \times 10^3 \times 0.55 = 0$ | | |
| 合計 | L = 77+66+9+44 = 196 | W = 2,583 | |
| | | ΔW = 1,193 | |

これらの表より、年間の日本全国総通電ロス量は、 $19,746 + 19,820 + 2,583 = 42,149$ 百万 kWh (約 420 億 kWh) となる。また、サイズアップによる年間の日本全国総通電ロス低減量は、 $10,397 + 9,752 + 1,193 = 21,342$ 百万 kWh (約 210 億 kWh) となる。この日本全国総通電ロス量 420 億 kWh は、日本全国の発電所で発電される総発電電力量が 9,710 億 kWh (2006 年度データ) であることより、その $420/9,710 = 4.3\%$ (約 4%) に相当する。また、サイズアップによる日本全国総通電ロス低減量 210 億 kWh は、 $210/9,710 = 2.2\%$ (約 2%) に相当する。

以上より、発電所端から需要家負荷端までの電力ロスの全体像を、現状 (2006 年度データ^{9), 10)} がベース) とサイズアップ完了後とで比較すると、図 II. 4. 3 の通りとなる。

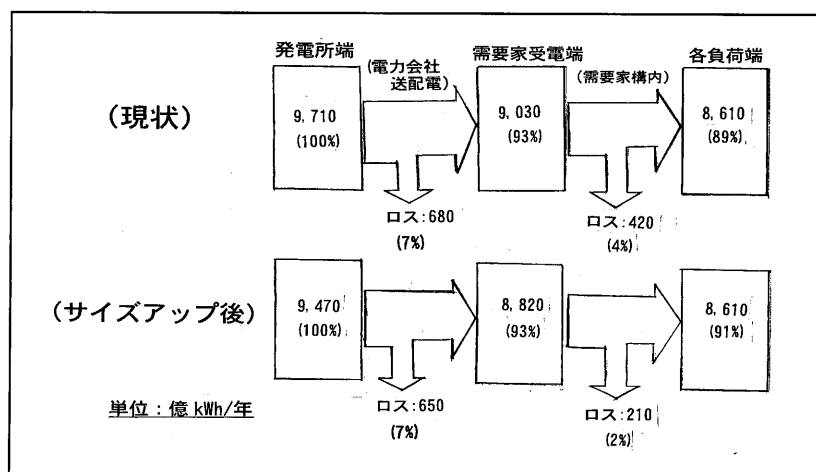


図 II. 4. 3 発電所端から需要家負荷端までの電力ロス

4. 7 CO₂ 排出削減量の算出

前節で求めたサイズアップによる日本全国総通電ロス低減量による日本全国総 CO₂ 排出削減量 Z (百万 t) は、単位電力量発電時の CO₂ 排出量を 表 II. 4. 8 に示した全国 10 電力会社発表の直近のデータ¹¹⁾ をもとに、その加重平均値をとって、 $(431 \text{ 百万 t}) / (9,718 \text{ 億 kWh}) = 0.444 \text{ CO}_2\text{-kg/kWh}$ とすると、次式の通り求まる。

$$Z = 21,342 (\text{百万 kWh}) \times 0.444 (\text{CO}_2\text{-kg/kWh}) \doteq 9.5 (\text{百万 t}) \cdots \cdots (\text{II. 4. 6})$$

これは、京都議定書の基準年度 (1990 年) における日本全国総 CO₂ 排出量が 1,261 百万 t (環境省データ) であることより、その 0.75 % に相当する。

表Ⅱ. 4. 8 日本全国の発電による CO₂ 排出量 (2008 年実績)

| | CO ₂ 排出係数① (CO ₂ -kg/kWh) | 発電電力量 ② (億kWh) | CO ₂ 排出量(①×②) (百万t) |
|-------|--|-------------------|-----------------------------------|
| 北海道電力 | 0.588 | 358 | 21 |
| 東北電力 | 0.469 | 891 | 42 |
| 東京電力 | 0.418 | 3,142 | 131 |
| 中部電力 | 0.455 | 1,412 | 64 |
| 北陸電力 | 0.550 | 312 | 17 |
| 関西電力 | 0.355 | 1,591 | 56 |
| 中国電力 | 0.674 | 667 | 45 |
| 四国電力 | 0.378 | 321 | 12 |
| 九州電力 | 0.374 | 939 | 35 |
| 沖縄電力 | 0.946 | 85 | 8 |
| 計 | — | 9,718 | 431 |

4. 8 あとがき

新しく開発した「環境配慮電流」に基づき、日本全国の需要家（工場・ビル）構内の低圧 CV-T ケーブル(1, 900 千 km)を全てサイズアップ品に置き替えた時、それによる年間の日本全国総 CO₂ 排出削減量は 9.5 百万 t となり、これは、1990 年の日本全国総排出量（1, 261 百万 t）の 0.75 % に相当することがわかった。

また、従来より発電端から需要家受電端までの送配電ロス（約 7%）についてはよく知られてきたが、今回、受電端以降の需要家構内の低圧 CV-T ケーブルにおける通電ロスが、さらに 4% 程度あることが明らかになり、併せて、サイズアップによりその 4% が 2% に半減できることを示すことができた。

参考文献

- 1) 林 正雄：「電気の実務がわかる本」、オーム社、pp. 109～115 (2008)
- 2) 内線規定 (JEAC 8001-2005)：「1310 節 (電圧降下) の 1310-1 [電圧降下]、及び資料 1-3-2 (電線最大こう長表) の 3. 電圧降下計算式」、(社) 日本電気協会 需要設備専門部会
- 3) 益尾和彦、久米伸一、原 武久：「ビル・工場及び住宅の 200V 配線を対象とした電線・ケーブル (CV-T, VVF) の導体サイズアップの検討」、電気設備学会

誌、Vol. 29、No. 4、pp. 307～315、表—1 (2009)

- 4) (社) 日本電設工業協会、(社) 電気設備学会：「2005 年新築ビルディング電気設備データ一覧表」、電設技術 (オーム社)、平成 19 年 1 月号、pp. 165～170 (2007)
- 5) (社) 電気設備学会：「電力余力判定方法の調査研究報告書」 (2006)
- 6) 桑原健一ほか：「工場・ビル・施設における省エネルギー診断と具体的対策」、(株) エヌ・ティー・エス (2000)
- 7) 小林浩ほか：「高圧需要家への自動力率調整装置導入が配電系統へ与える効果の定量評価」、電気設備学会誌、Vol. 28、No. 2、pp. 153～159 (2008)
- 8) 大橋巧：「最近の病院における熱負荷変動の傾向」、建設設備と配管工事、平成 19 年 11 月号、pp. 36～40 (2007)
- 9) 電気事業連合会：「電気事業における環境行動計画」 (2007 年 9 月)、
<http://www.fepc.or.jp/env/report/2007.pdf>、p. 13
- 10) 電気事業連合会：「2007 年度の発受電速報」 (2008 年 4 月 15 日)、
<http://www.fepc.or.jp/news/hatsu/2007.pdf>、表 1
- 11) 各電力会社の H. P.

<http://www.tepco.co.jp/eco/report/glb/02-j.html>

http://www.hepco.co.jp/ato_env_ene/environment/action/data.html

<http://www.tohoku-epco.co.jp/enviro/index.html>

http://www.chuden.co.jp/corpo/csr/report/pdf/2009_kankyo.pdf

<http://www.kepco.co.jp/kankyou/csr/data/data01.html>

<http://www.rikuden.co.jp/kankyodata/co2haisyutsugentani.html>

<http://www.energia.co.jp/press/09/p090731-1b.html>

<http://www.yonden.co.jp/faq/sonota/index.html#07>

http://www.kyuden.co.jp/library/pdf/environment/action-report09/booklet/action_report_01_01.pdf

<http://www.okiden.co.jp/environment/report2009/08/pdf/15.pdf>

結論

本研究は、脱塩化ビニルと LCA を重視した電線・ケーブルの環境配慮設計に関するもので、本論文では、第Ⅰ部では脱塩化ビニル電線（エコ電線）の開発と使用済み塩化ビニルの電線への再使用、第Ⅱ部では電力ケーブルの導体サイズ適正化による通電ロス低減・CO₂排出削減について述べた。以下に結論を第Ⅰ部と第Ⅱ部に分けて述べる。

第Ⅰ部（材料関連）

ベース樹脂に メタロセン C8-LLDPE を選定し、それに難燃剤の水マグを高充填することで、加熱変形しにくく、難燃性かつ加工性に優れたエコ電線を開発した。同時に、従来不明であった水マグの吸熱作用による難燃性付与メカニズムについても解明した。また、難燃剤を高充填した樹脂が持つ実使用上の 4 つの問題点（白化現象、絶縁抵抗低下現象、汗をかく現象、沿面フラッシュオーバー現象）の対策として、電線被覆層を 2 層にし、その外層は難燃剤の入っていない樹脂を薄く被覆する構造を考え、試作実験により、その構造が抜本対策となることを明らかにした。

エコ電線に難燃剤として多量充填されている水マグを、従来の合成品（製造時エネルギー消費量大）から天然品（製造時エネルギー消費量小）に替えることで、CO₂の大幅削減が可能になることに着目し、天然水マグの長所を生かしつつ、欠点を技術的に補い、さらに赤リン添加によりその充填量を必要最低限にまで減らすことで、製造時における CO₂を塩ビ電線対比 20% 程度まで削減したエコ電線を実現した。

使用済み塩ビを再使用して製造した電線が、次の一生（ライフサイクル）の使用に耐えるかを確認するため、まず、バージン塩ビを用いた実験室レベルの実験で、塩ビは 2 回のライフサイクルに十分耐えることを明らかにした。また、使用済み塩ビ電線から採取した塩ビをそのまま電線に再使用しても次のライフサイクルに耐えるレベルにあることを確認し、同時に、ポリエチレンが 5%以下混入していても問題なく使えること、10%混入の場合でも、ポリマーアロイ技術を適用することで使用に耐えるレベルになることを明らかにした。また、回収農業用塩ビフィルムの劣化は分子鎖の切断まで進んでいないことを確認し、再生配合により電線用として再使用できることを明らかにした。

第Ⅱ部（サイズ適正化）

導体サイズアップを進めるにあたり、アップすべき最適サイズを決める必要があったため、IEC 規格の経済性重視の考え方をベースに検討を行ない、サイズを導体断面積で 2 倍に増大することで、ライフサイクルコスト (LCC) をミニマムにできることを示した。また、サイズアップによる CO₂ 削減量について概略の試算を行い、日本全国総 CO₂ 排出量の約 1% に相当する削減が可能という結果を得た。さらに、CO₂ 削減効果では、導体サイズアップが昇圧化より有効であることを明らかにした。

ビル・工場で大量に使用されている低圧 CV-T ケーブルを対象に、表面の温度上昇を測定すれば、取り替えの対象ケーブルが特定できると考え、その可能性を確認するため、通電ロスによるケーブル表面温度上昇値を計算で求めた。その結果、通電ロスによるケーブル表面の温度上昇が 10℃ 程度であることから、表面温度を測定することによりサイズアップの対象ケーブルが容易に特定できる目処がついた。また、サイズアップ前後それぞれのケーブルを用いた実験を行い、ケーブルの通電ロス量とケーブル表面温度上昇値を実測した結果、測定値と理論値が一致することが確認できた。さらに、住宅の 200V 配線に使用されている VVF ケーブルを対象に、サイズアップしてもたわみ性を損なわない複合構造の新規ケーブルを開発し、それをエコキュートと IH クッキングヒータの電源電線用に適用すると、1 世帯当たり年間 12 kWh 程度の電力量が節約できるという結果を得た。

IEC 規格の LCC の考え方をベースに、新たに LCA の考え方を取り入れ、それをコスト換算して加算し、その結果得られる LCC と LCA の合算値を新たな定義のライフサイクルコストとし、それがミニマムとなる最適電流値を算出するという、新しい導体サイズ決定指針を考えだした。また、負荷電流パターンの実態を、工場や事務所ビルなど分野ごとに調査したところ、3 つのケースに明確に区分できることがわかったので、それぞれ別々に、その電流パターンに応じ最適電流値を算出することで、指針のさらなる明確化を図った。

上記の「新しい導体サイズ決定指針」に基づき、日本全国の需要家（工場・ビル）構内の低圧 CV-T ケーブル（1,900 千 km）を全てサイズアップ品に置き替えた時、それによる日本全国の年間総 CO₂ 排出削減量は 9.5 百万 t になることを明らかにした。これは、1990 年の日本全国総排出量（1,261 百万 t）の 0.75 % に相当する。なお、銅生産量増による CO₂ 排出増加量は年間 0.479 百万 t で、これが 20 年間継続すると 9.58 百万 t にもなるが、年間総排出削減効果が 9.5 百万 t あることより、ほぼ 1 年で回収が可能なレベルである。また、発電端から需要家受電端までの送配電ロス（約 7%）についてはよく知られてきたが、今回、

受電端以降の需要家構内低圧 CV-T ケーブルによる通電ロスが、さらに 4% 程度あることが明らかになり、併せて、サイズアップにより 4% から 2% にまで半減できることを明らかにした。

本研究の位置付けについて、過去の導体サイズアップに関する研究は国内ではなく、主として欧州を中心になされたが、それも地球温暖化が叫ばれ始めた 2005 年以前のものばかりであり、環境 (CO₂ 排出) に焦点を当てた今回のサイズ適正化の研究は、世界的にも初めてと言えるものである。

謝辞

本研究の遂行および本論文の作成にあたり、終始懇切なるご指導、ご鞭撻を賜りました 京都大学大学院工学研究科の大澤靖治教授に心より感謝の意を表します。また、本論文を取り纏めるにあたり、多くの暖かいご指導ならびに貴重なご助言を賜りました 京都大学大学院工学研究科の引原隆士教授ならびに和田修己教授に感謝の意を表します。

第Ⅰ部（材料関連）の研究の遂行にあたり、ご協力を戴いた住友電気工業株式会社・高分子材料技術研究部の小林裕様、北海道電機株式会社の日浦孝久様、株式会社ジェイ・パワーシステムズの山崎直哉様、ならびに社団法人日本電線工業会・技術部の亀田実様に感謝の意を表します。

第Ⅱ部（サイズ適正化）の研究の遂行にあたり、終始懇切なるご指導、ご鞭撻を賜りました 関西大学・システム理工学部の 原 武久 元教授に心より感謝の意を表します。また、本研究の遂行にあたり、ご援助とご協力を戴いた財団法人省エネルギーセンター・診断指導部の久米伸一様に感謝の意を表します。また、本研究の遂行にあたり、ご協力を戴いた社団法人電気設備学会・フォーラム関西、ならびに社団法人日本電線工業会・大阪支部技術研究会の皆様に、感謝の意を表します。最後に、本研究は、2007～2009 年の約 2 年間にわたり、工場・ビルの施主、ゼネコン、サブコン、設計事務所、エンジニアリング会社、保守・メンテナンス会社などの関係者、合せて 62 名にも及ぶ方々に、アンケート・聞き込み調査をさせて戴き遂行し得たものであり、末筆ながら、上記関係者の皆様方に感謝の意を表します。

発表論文リスト

第Ⅰ部（材料関連）

論文

- (1) 益尾和彦：「エコ電線の難燃性材料とその最適被覆構造」、電気設備学会誌、Vol. 27、No. 11、pp. 936～942（2007）
- (2) 益尾和彦：「エコ電線の難燃性材料への天然水マグ適用と赤リン添加による水マグ充填量低減」、電気設備学会誌、Vol. 28、No. 11、pp. 881～888（2008）
- (3) 益尾和彦：「リサイクル塩ビ電線の残存寿命と再生技術の適用」、電気設備学会誌に投稿済み。（受付日：2009年10月7日）

解説

- (1) 西方聡、益尾和彦、村上光平、権守仁彦、吉野勝美：「電気材料の環境対応技術」、電気材料技術雑誌、Vol. 12、No. 1、pp. 3～32（2003）
- (2) 益尾和彦：「エコ電線の新規難燃材料適用と今後の市場拡大の可能性について」、電気設備学会誌、Vol. 25、No. 11、pp. 850～853（2005）
- (3) 益尾和彦：「使用済み塩ビの電線への再利用技術と廃塩ビの埋め立て処理の実態」、電気設備学会誌、Vol. 27、No. 2、pp. 143～147（2007）
- (4) 益尾和彦：「LCA を重視した電線ケーブルの環境配慮設計」、電気と工事、Vol. 47、No. 1、pp. 79～85（2006）

第Ⅱ部（サイズ適正化）

論文

- (1) 益尾和彦、久米伸一、原武久：「電線ケーブルの導体サイズアップによるCO₂ 排出量低減効果の検討」、電気設備学会誌、Vol. 28、No. 11 pp. 873～880（2008）
- (2) 益尾和彦、久米伸一、原武久：「ビル・工場及び住宅の200V配線を対象とした電線・ケーブル(CV-T, VVF)の導体サイズアップの検討」、電気設備学会誌、Vol. 29、No. 4 pp. 307～315（2009）
- (3) 益尾和彦、久米伸一、原武久、大澤靖治：「環境(CO₂ 排出)を考慮した電力ケーブルのサイズ適正化に関する研究」、電気設備学会誌に投稿済み。

(受付日：2009年7月8日、本学会誌2010年5月号(Vol. 30、No. 5)に掲載予定)

解説

- (1) 益尾和彦、久米伸一、龍田啓一、川田隆之：「経済メリットから見る電線の導体サイズアップによる通電ロス低減」、電気と工事、Vol. 50、No. 3、pp. 45～52 (2009)
- (2) 益尾和彦、原達也：「オール電化住宅における電線サイズアップによる省エネ性について」、電気と工事、Vol. 49、No. 12、pp. 62～67 (2008)
- (3) 益尾和彦：「ライフサイクルコストを考慮した低圧 CVT ケーブルの最適電流容量」、電気と工事、Vol. 50、No. 12、pp. 55～60 (2009)
- (4) 久米伸一、益尾和彦：「電線導体サイズ2倍による省エネルギーについて」、生産と電気 ((社) 日本電気協会)、Vol. 61、No. 2、pp. 12～18 (2009)
- (5) 益尾和彦：「工場・ビルの低圧 CV-T ケーブルを対象とした導体サイズ2倍によるCO₂削減効果」、電気工事の友((社) 関東電気協会、オーム社)、Vol. 62、No. 5、pp. 34～39 (2009)
- (6) 益尾和彦：「電線サイズアップによる省エネとCO₂削減効果」、電力マンスリー ((社) 関東電気協会)、Vol. 57、No. 7、pp. 4～5 (2009)